



42º SENAFOR

Centro de Eventos do Hotel Continental
Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023

Anais PROCEEDINGS

Apresentação

Editores

Promoção

Equipes Organizadoras

Contatos

Apoio

Sessão de Abertura



42º SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil



25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas

12ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas

9º Congresso do BrDDRg



RENOMAT

12ª Conferência Internacional de Materiais
e Processos para Energias Renováveis



Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura



42° SENAFOR

Centro de Eventos do Hotel Continental
Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023

Anais
PROCEEDINGS



42° SENAFOR

26ª Conferência
Internacional de
Forjamento – Brasil



25ª Conferência Nacional de
Conformação de Chapas
12ª Conferência Internacional
de Conformação de Chapas
9º Congresso do BrDDRg



12ª Conferência Internacional
de Materiais e Processos para
Energias Renováveis



Conferência Internacional
de Inovação em Materiais
e Manufatura

APRESENTAÇÃO

O SENAFOR – originalmente titulado Seminário Nacional de Forjamento - é um evento atualmente em sua 42ª edição que busca, através de troca de conhecimentos e debates, uma constante integração academia-indústria, mas também de conagração, tendo como foco o tema principal INOVAÇÃO, PRODUTIVIDADE e EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.

Nesta edição, abrigou as seguintes conferências:

- **26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil**
- **25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRg**
- **12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis RENOMAT**
- **1ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura INOVMAT**

ee foi realizado no Centro de Eventos do Hotel Continental, em Porto Alegre -RS, nos dias **4, 5 e 6 outubro de 2023**.

Nosso tema foi, e será sempre, INOVAÇÃO, PRODUTIVIDADE e EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.

Tivemos, além das palestras presenciais e on-line de professores especialmente convidados, apresentações de trabalhos técnicos orais e em pôster, uma área física para exposição de produtos e serviços de importantes empresas apoiadoras e parceiras do SENAFOR.

Cumpramos destacar o apoio financeiro da CAPES – Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, e o apoio institucional de importantes entidades e empresas do segmento automotivo, metal-mecânico e correlatos.

Estes Anais apresentam, na íntegra, os textos das palestras e dos trabalhos técnicos recebidos e efetivamente apresentados durante a realização das sessões nas Conferências, e acreditamos que a sua leitura será de grande interesse e proveito para todos os que atuam nessas áreas.

Prof. Dr. Eng. Lirio Schaeffer
Coordenador-Geral do SENAFOR



42° SENAFOR

Centro de Eventos do Hotel Continental
Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023

Anais
PROCEEDINGS



42° SENAFOR

26ª Conferência
Internacional de
Forjamento – Brasil



25ª Conferência Nacional de
Conformação de Chapas
12ª Conferência Internacional
de Conformação de Chapas
9º Congresso do BrDDRg



12ª Conferência Internacional
de Materiais e Processos para
Energias Renováveis



Conferência Internacional
de Inovação em Materiais
e Manufatura

Editado por / Edited by

Prof. Dr. Eng. Lirio Schaeffer (CBCM – UFRGS).

Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha (LDTM – UNFRGS)

Prof. Dr. Eng. Alberto Moreira Guerreiro Brito (LDTM – UFRGS).

Prof. Dr. Eng. João Henrique Corrêa de Souza (TechnNOVA Pesquisa Desenvolvimento e Inovação)

Prof. Dra. Patrice Monteiro de Aquim (FEEVALE)

Prof. Dr. Eng. Eduardo Luis Schneider (DEMAT – UFRGS)

ANAIS / PROCEEDINGS

ISSN 2764-4316

Anais Senafor - Seminário Nacional de Forjamento.

Os textos aqui incluídos são da exclusiva responsabilidade de seus autores e publicados conforme o original enviado. Todos os direitos e autorização de uso das informações contidas nestes anais pertencem aos editores.

*The texts of these proceedings were printed according to the original sent by the authors.
All rights on the contents belong to the editors.*

www.senafor.com



42° SENAFOR

Centro de Eventos do Hotel Continental
Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023

Anais
PROCEEDINGS



42° SENAFOR

26ª Conferência
Internacional de
Forjamento – Brasil



25ª Conferência Nacional de
Conformação de Chapas
12ª Conferência Internacional
de Conformação de Chapas
9º Congresso do BrDDRg



12ª Conferência Internacional
de Materiais e Processos para
Energias Renováveis



Conferência Internacional
de Inovação em Materiais
e Manufatura

PROMOÇÃO E REALIZAÇÃO

- Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS
- Laboratório de Transformação Mecânica - LdTM
- Centro de Tecnologia (CT) – Centro de Inovação em Conformação Mecânica Metal Forming Innovation Center (CBCM)
- Grupo Brasileiro de Pesquisas em Conformação de Chapas (Brazilian Deep Drawing Research Group)
- Universidade FEEVALE
- Fundação Luiz Englert





42° SENAFOR

Centro de Eventos do Hotel Continental
Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023

Anais
PROCEEDINGS



42° SENAFOR

26ª Conferência
Internacional de
Forjamento – Brasil



25ª Conferência Nacional de
Conformação de Chapas
12ª Conferência Internacional
de Conformação de Chapas
9º Congresso do BrDDRg



12ª Conferência Internacional
de Materiais e Processos para
Energias Renováveis



Conferência Internacional
de Inovação em Materiais
e Manufatura

EQUIPES ORGANIZADORAS

Coordenação geral

Prof. Dr. Eng. Lirio Schaeffer (CBCM / UFRGS)

Prof. Dr. Eng. Alexandre da Silva Rocha (LDTM / UFRGS)

27ª CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE FORJAMENTO – BRASIL

Coordenação:

Prof. Dr. Eng. Alberto Moreira Guerreiro Brito (LdTM / UFRGS)

Prof. Dr. Halston Mozetic (SEDETEC / LdTM / UFRGS)

Colaboradores:

MSc. Eng. André Rosiak (UFRGS)

MSc. Eng. Thomas Gomes dos Santos (UFRGS)

Eng. Renan Silvano Krapf (UFRGS)

Comissão Científica:

Prof. Dr. Paulo António Firme Martins (IST/Universidade de Lisboa, Portugal)

Prof. Dr. Alex Bueno (UFSC – Campus Blumenau)

Prof. Dr. Alisson Duarte da Silva (UFMG)

Dr. Eng. Alberto Moreira Guerreiro Brito (LDTM / UFRGS)

Drª Engª Ana Paola Villalva Braga (IPT SP)

Prof. Dr. Eng. Carlos Alexandre dos Santos (PUCRS)

Prof. Dr. Carlos Augusto Silva de Oliveira (UFSC)

Dr. Eng. Carlos Eduardo Pinedo (ABM)

Profª Draª Engª Luana de Lucca de Costa (IFSul)

Prof. Dr. Mauro Moraes de Souza (Centro Universitário FEY)

Prof. Dr. Oscar Balancin (UFSCar)

Prof. Dr. Roderval Marcelino (UFSC)



42° SENAFOR

Centro de Eventos do Hotel Continental
Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023

Anais PROCEEDINGS



42° SENAFOR

26ª Conferência
Internacional de
Forjamento – Brasil



25ª Conferência Nacional de
Conformação de Chapas
12ª Conferência Internacional
de Conformação de Chapas
9º Congresso do BrDDRg



12ª Conferência Internacional
de Materiais e Processos para
Energias Renováveis



Conferência Internacional
de Inovação em Materiais
e Manufatura

26ª CONFERÊNCIA NACIONAL DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS / 13ª CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS / 10º CONGRESSO DO BRDDRg (GRUPO BRASILEIRO DE PESQUISAS EM CONFORMAÇÃO DE CHAPAS)

Coordenação:

Prof. Dr. Eng. Alexandre da Silva Rocha (LDTM / UFRGS)

Prof. Dr. Eng. Joao Henrique Correa de Souza (TechnNOVA Engenharia & Inovação)

Colaborador:

MSc. Eng. Rafael Pandolfo da Rocha (UFRGS)

Comissão Técnico/ Científica (BrDDRg):

Alexandre da Silva Rocha (UFRGS)

Carlos Augusto Silva de Oliveira (UFSC)

Cesar Batalha (AutoFORM)

Claudeir Silveira (ArcelorMittal)

Ed Taiss (CBMM)

Gilmar Batalha (POLI USP)

Giuliano Castelo Branco Dias (CSN)

Heber Pires Otomar (CBA)

Jesualdo Rossi (IPEN)

João Henrique Corrêa de Souza (TechnNOVA PD&I)

José Castillo (Consultor, FSA)

Lirio Schaeffer (UFRGS)

Luciano Pessanha (UFF)

Marco Antonio Colosio (GM do Brasil, FSA)

Marco Antonio Wolff (USIMINAS)

Paulo Cetlin (UFMG)

Paulo Victor Prestes Marcondes (UFPR)

Rafael Bassan (Embraer)

Rodrigo Santiago Coelho (SENAI/CIMATEC)

Tarcísio Reis de Oliveira (Aperam)

Tulio Magno Fuzessy de Melo (PUC Minas)



42° SENAFOR

Centro de Eventos do Hotel Continental
Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023

Anais
PROCEEDINGS



42° SENAFOR

26ª Conferência
Internacional de
Forjamento – Brasil



25ª Conferência Nacional de
Conformação de Chapas
12ª Conferência Internacional
de Conformação de Chapas
9º Congresso do BrDDRg



12ª Conferência Internacional
de Materiais e Processos para
Energias Renováveis



Conferência Internacional
de Inovação em Materiais
e Manufatura

12ª CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE MATERIAIS E PROCESSOS PARA ENERGIAS RENOVÁVEIS

Coordenação:

Prof.ª Dr.ª Patrice Monteiro de Aquim (Universidade FEEVALE)

Prof. Dr. Eng. Josimar Souza Rosa (UNISINOS)

Prof.ª Dr.ª Eng. Mec. Adriane Prisco Petry (DEMEC/PROMEC | NIEPIEE - UFRGS)

Prof. Dr. Eng. Lirio Schaeffer (CBCM UFRGS)

Colaboradores:

MSc. Eng. Monir Göethel Borba (UFRGS)

MSc. Eng. André Possamai Rosso (UFSC)

Dr. Eng. Mec. Halston Mozetic (UFRGS)

Engª Mec. Caroline Theves Carabajal (UFRGS)

Comissão Científica:

Profª Drª Engª Aline Cristiane Pan (UFRGS)

Prof. Dr. Eng. Alex Fabiano Bueno (UFSC Campus Blumenau)

Prof. Dr. Roderval Marcelino (UFSC)

Prof. Dr. Ronaldo Antonio Guisso (Universidade FEEVALE)

Prof. Dr. Vilson Gruber (UFSC)

2ª CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE INOVAÇÃO EM MATERIAIS E MANUFATURA

Coordenação:

Prof. Dr. Eduardo Luis Schneider (DEMAT / UFRGS)

Colaboradores:

Prof. Dr. Eng. Joao Henrique Correa de Souza (TechnNova Engenharia & Inovação)

Dr. Eng. Alberto Moreira Guerreiro Brito (LdTM / CBCM / UFRGS)

Dr. Eng. Diego Pacheco Wermuth (UFRGS)

Dr. Eng. Halston Mozetic (UFRGS)

MSc. Eng. Rafael Pandolfo da Rocha (UFRGS)

Eng. Bruno Oliveira (ADDITIVA)

MSc. Fernando Ferreira Fernandez (Consultor Independente em Inovação em Tecnologia de Materiais)

Comissão Científica:

Prof. Dr. Eng. Lirio Schaeffer (UFRGS / CBCM)

Prof. Dr. Jorge Luís Braz Medeiros (FURG)

Prof.ª Dr.ª Patrice Monteiro de Aquim (Universidade FEEVALE)

Prof. Dr. Eng. Oswaldo Hideo Ando Junior (UFRPE)

Prof. Dr. Eng. Aloisio Nelmo Klein (UFSC)

Prof. Dr Paulo Roberto Cetlin (UFMG / Belo Horizonte MG)

Prof. Dr Oscar Balancin (UFSCar/ Campinas SP)

Prof. Dr Arno Richter (ArcelorMittal/ Bremen – Alemanha)

Prof. Dr. Eng. Renato Ventura Bayan Henriques (UFRGS)



42° SENAFOR

Centro de Eventos do Hotel Continental
Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023

Anais
PROCEEDINGS



42° SENAFOR

26ª Conferência
Internacional de
Forjamento – Brasil



25ª Conferência Nacional de
Conformação de Chapas
12ª Conferência Internacional
de Conformação de Chapas
9º Congresso do BrDDRg



12ª Conferência Internacional
de Materiais e Processos para
Energias Renováveis



Conferência Internacional
de Inovação em Materiais
e Manufatura

CONTATO / CONTACT

Centro Brasileiro de Inovação em Conformação Mecânica / CBCM

Metalforming Innovation Center / CBCM

Universidade Federal do Rio Grande do Sul UFRGS

Universidade Federal do Rio Grande do Sul UFRGS

Av. Bento Gonçalves 9500

Caixa postal 15021

Centro de Tecnologia - Campus da Agronomia

91501-970 Porto Alegre - RS

Fundação Luiz Englert - FLE

Rua Matias José Bins, 364

Bairro Três Figueiras

CEP: 91.330-290

Porto Alegre / RS / Brasil

Fone: +55 +51 3286.4333 / 3286.4343 / 99679.4662

E-mail: fle@fle.org.br

Secretaria

SECRETARIAT Secretaria para Eventos

Lourdes Grings

E-mail: senafor.br@gmail.com / senafor@senafor.net

Telefone/WhatsApp: +55 (51) 99981-2841



42° SENAFOR

Centro de Eventos do Hotel Continental
Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023

Anais
PROCEEDINGS



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil



25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas
12ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas
9º Congresso do BrDDRG



12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis



Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura

Apoio



Mídia Apoiadora

REVISTA DO PARAFUSO

Expositores





42° SENAFOR

Centro de Eventos do Hotel Continental
Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023

Anais
PROCEEDINGS



42° SENAFOR

26ª Conferência
Internacional de
Forjamento – Brasil



25ª Conferência Nacional de
Conformação de Chapas
12ª Conferência Internacional
de Conformação de Chapas
9º Congresso do BrDDRg



12ª Conferência Internacional
de Materiais e Processos para
Energias Renováveis



Conferência Internacional
de Inovação em Materiais
e Manufatura

SESSÃO DE ABERTURA DO 42° SENAFOR OPENING SESSION

OPENING / WELCOME

Lirio Schaeffer (LdTM/CBCM/UFRGS)

Alexandre da Siva Rocha (LdTM/UFRGS)

KEYNOTE LECTURE: OBJETIVOS DA DESCARBONIZAÇÃO NA NEO INDUSTRIALIZAÇÃO E NA RE INDUSTRIALIZAÇÃO DO SETOR PRODUTIVO DA MOBILIDADE

Dr. Carlos Sakuramoto (ANFAVEA – São Paulo/SP)

KEYNOTE LECTURE: E-SYS – SISTEMAS DE TRACÇÃO AUXILIAR REGENERATIVO E-SYS -REGENERATIVE AUXILIARY DRIVE AXLE SYSTEM

Eng. Carlos Eduardo Michelin Beraldo (Head de Eletromobilidade SUSPENSYS Brasil / Caxias do Sul/RS)

KEYNOTE LECTURE: PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO DA SICT PARA PROMOVER A INOVAÇÃO, PRODUTIVIDADE E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Dr. Raphael Ayub (Secretário Adj – Secretaria de Inovação, Ciência e Tecnologia do RS)



42° SENAFOR

26ª CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE FORJAMENTO - BRASIL
26TH INTERNATIONAL FORGING CONFERENCE - BRAZIL

PALESTRAS E TRABALHOS TÉCNICOS LECTURES & TECHNICAL PAPERS

FORJAMENTO 1

Digitalizing the tooling industry – driving productivity and sustainability

Digitalização da indústria de ferramentas – impulsionando a produtividade e a sustentabilidade (tradução livre)

Prof. Dr.-Ing. Kristian Arntz (University of Applied Sciences FH Aachen - Alemanha)

FORJAMENTO 2

FRED – Product Carbon Footprint Reduction Tool for the Metalforming Industry

FRED – Redução de Carbono na Fabricação de Ferramentas na Indústria de Conformação Mecânica (tradução livre)

Dr.-Ing. Hans-Willi Raedt (Prosimalys GmbH, Aachen - Alemanha)

FORJAMENTO 3

Caracterização dos Limites de Enformabilidade à Fratura por Extrusão Radial

Characterization of the Fracture Forming Limits in Bulk Forming by Means of Radial Extrusion

Rui F.V. Sampaio, João P.M. Pragana, Ivo M.F. Bragança, Carlos M.A. Silva, Chris V. Nielsen and Paulo A.F. Martins (Instituto Técnico Superior, IDMEC – Lisboa, Portugal)

FORJAMENTO 4

Da Usina a Forjaria: Cases usando o QForm UK

From Steel Plants to Forging Companies: Cases using QForm UK

Alisson Duarte (UFMG-SIXPRO) Belo Horizonte-MG.

FORJAMENTO 5

Digitalização do processo de extrusão a frio utilizando uma combinação de monitoramento do componente em queda livre com controle em IA para posição axial do punção

Digitization of cold extrusion processes using a combination of free-fall part monitoring with AI-controlled axial punch position

Tahsin Deliktas, Jonathan Böhm, Diego R. Alba, Mathias Liewald (Institute for Metal Forming Technologies (IFU) – University of Stuttgart, Stuttgart -Alemanha)

FORJAMENTO 6

Otimização de projeto de matriz de forjamento a quente (fabricação sustentável) utilizando análises por FEM para conformação NNS de um eixo de pinhão de Aço 18CrNiMo7-6 para aerogeradores

Hot forging die design optimization (green manufacturing) using FEM analysis for Near-Net-Shape forming of 18CrNiMo7-6 steel pinion shaft for wind turbine

Charles Chemale Yurgel, Nijenthan Rajendran, Wojciech Z. Misiolek e Nicholas Matthias Rockwell (Lehigh University, Bethlehem - Pensilvânia USA); Ricardo Alves Sousa (University of Aveiro, Portugal)

FORJAMENTO 7

Desenvolvimento de Progressão Baseado em Simulação para Peças Forjadas complexas (tradução livre)

Simulation based progression development for complex forged parts.

Gerhard H. Arfmann, Michael Twickler (CPMgmgH /Alemanha); Pedro David Schmitt (AÇOPEÇAS, Guabiruba - SC) Carlos Alberto Paiano, Carlos Eduardo Vidotto (DPR, Tijucas - SC)



42° SENAFOR

26ª CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE FORJAMENTO - BRASIL
26TH INTERNATIONAL FORGING CONFERENCE - BRAZIL

FORJAMENTO 8

Investigación experimental y computacional sobre el recalado en caliente de anillos de dos grados de acero

Experimental and Computational Research on Hot Upsetting of Two-Grade Steel Rings

German Abate, Daniel Osvaldo Martínez Krahmer, Alejandro Simoncelli, (INTI); Cristian Obermann (UNLZ); Nazareno Antunez (UNLZ – INTI); Alberto Pereyra Osenda (UNAHUR - CAC-CNEA). Buenos Aires- Argentina

FORJAMENTO 9

Avaliação da Vida Útil de Inseto para Usinagem do Aço Microligado DIN 38MnVS6 pelo Controle de Resfriamento Após Forjamento a Quente

Tool Life Cycle Assessment for Machining of 38MnVS6 Microalloyed Steel by Cooling Control after Hot Forging

Guilherme Oliveira Goulart, Cleiton Arial Nunes, Juliano de Souza da Silva, Santiago Henkel Blauth, Tomaz Petracco (Maxiforja, Canoas - RS); Alisson S. Duarte (SIXPRO Virtual & Practiac Process- Belo Horizonte-MG); Carlos Alexandre dos Santos (PUC/RS, Porto Alegre-RS).

FORJAMENTO 10

Influência da Geometria Inicial de Tarugos em Ocorrências de Trincas Superficiais para Forjados Redondos em Matriz Aberta.

Influence of initial billet geometry on occurrences of surface cracks for round forgings in an open die.

João Francisco Ruy da Cunha, Roberto Tiburcio C. Frota Jr. e Mahira Adna Cota Araujo (VillaresMetals, Sumaré – SP)

FORJAMENTO 11

Evolução do Tamanho de Grão e o Resfriamento Controlado com Foco na Resistência Mecânica Final do Forjado – uma Primeira Análise

Grain Size Evolution and Controlled Cooling focused on the Forged Part Mechanical Resistance – a First Analysis

Guilherme O. Goulart (MAXIFORJA/PUCRS – Canoas RS); João V. do Carmo e Luiz L. T. Vaughan (UNIFEI); José A. G. de Souza (UTFPR); e Alisson S. Duarte (SIXPRO Virtual&Practical Process – Belo Horizonte MG)

FORJAMENTO 12

Estudos estatísticos para análise e definição de tolerâncias geométricas aplicadas a produtos forjados.

Statistical Studies for Analysis and Definition of Geometric Tolerances Applied to Forged Products.

Santiago Henkel Blauth (UFRGS); Cleiton Nunes, Guilherme Goulart, Juliano da Silva (Tomaz Petracco (MAXIFORJA- Canoas-RS)

FORJAMENTO 13

Impressão 3D de Pré-Formas Forjadas a partir da Simulação por Elementos Finitos

Forging Preform 3D Print from FE Simulations Results

Felipe S. Oliveira, Nicholas Beggs (ARCO Forjado – São Paulo); Alisson S. Duarte (SIXPRO Virtual&Practical Process – Belo Horizonte/ MG).

FORJAMENTO 14

Aumento da Vida Útil das Matrizes de Forjamento a Quente de um Cubo com o Auxílio da Simulação

Die Life Increasing in a Hot Forging Cube Part Assisted by FE Simulation

Felipe S. Oliveira, Nicholas Beggs (ARCO Forjado – São Paulo/SP); Alisson S. Duarte (SIXPRO – Belo Horizonte -SP)



42° SENAFOR

26ª CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE FORJAMENTO - BRASIL
26TH INTERNATIONAL FORGING CONFERENCE - BRAZIL

FORJAMENTO 15

Rebarbação na Indústria de Forjamento a Quente: O Potencial da Manufatura Aditiva e Modelos Matemáticos para Eficiência e Qualidade

Flash Trimming in the Hot Forging Industry: The Potential of Additive Manufacturing and Mathematical Models for Efficiency and Quality

Cleiton Ariel Nunes, Guilherme Oliveira Goulart, Juliano de Souza da Silva, Santiago Henkel Blauth (MAXIFORJA – Canoas- RS); Carmen Lara Walter Calcagno (IFSUL – Sapucaia do Sul - RS)

FORJAMENTO 16

Estudo da influência dos parâmetros de esferoidização do aço SAE 8620 na conformabilidade por forjamento a frio.

Study of spheroidization parameters on formability by cold forging of SAE 8620 steel.

Felipe Moreno Siqueira Borges de Carvalho (IPT); Ana Paola Villalva Braga, Dany Michell Andrade Centeno, Leonardo Rodrigues Danninger (IPT – São Paulo SP); Henrique Morales Zaggo, Camila de Brito Ferreira (GERDAU – Pindamonhangaba SP)

FORJAMENTO 17

O Monitoramento do Processo de Forjamento para a Indústria 4.0

MachineView & FactoryView - The Forging Process Monitoring for Industry 4.0

João Batista Graef (SOUTHWIND INTERNATIONAL – São Paulo SP)

FORJAMENTO 18

Efeito do tempo de recozimento de recristalização nas propriedades mecânicas, na microestrutura e na precipitação de carboneto em aço baixo carbono recalado a frio

Effect of recrystallization annealing time on mechanical properties, microstructure and carbide precipitation in cold upsetting of low carbon steel

Cassio Aurelio Suski (IFSC- Itajaí SC); César Edil da Costa e Julio Cesar Giubilei Milan (UDESC – Joinville SC)

FORJAMENTO 19

Controle Avançado de Temperatura em Fornos de Aquecimento por Indução

Advanced Temperature Control for Induction Billet Heaters

Leandro Felix Pasti e Rodolfo Fonseca Gonçalves (Inductotherm Group Brasil)

FORJAMENTO 20

Uso do programa ELTA / 2DELTA para análise e projeto de uma linha de forjamento com base na especificação térmica e de produtividade

Use of ELTA / 2DELTA program for analysis and design of a forging line based on thermal and productivity specification

José Carlos Zerbini (Synergetica Sistemas e Processos); Tomaz Petracco, Mateus Lima da Silva, Claudeci Rodrigues e Eduardo Baptistelli (MAXIFORJA-Canoas-RS); Paulo Roberto de Carvalho (PRC indução); Alexander N. Ivanov (Saint-Petersburg Electrotechnical University (LETI), Rússia.

FORJAMENTO 21

Previsão de Quebra por Fadiga em Ferramenta de Forjamento a Frio

Fatigue Cracking Prediction in Cold Forging Die

Nicolas S. Machado (Ciser – Joinville - SC); Alisson S. Duarte (Sixpro -Belo Horizonte -MG)



42º SENAFOR

26ª CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE FORJAMENTO - BRASIL
26TH INTERNATIONAL FORGING CONFERENCE - BRAZIL

FORJAMENTO 22

Indústria 5.0 x Gestão 5.0 – Impactos na indústria de conformação mecânica

Industry 5.0 x Management 5.0 – Impacts on the metal forming industry

Wilson Gruber (UFSC Araranguá SC) e Lirio Schaeffer (LdTM UFRGS)

FORJAMENTO 23

Análise computacional do Método Polakowski para o ensaio de compressão a frio de metais sem o efeito de atrito entre o material e as matrizes

Computational analysis of the Polakowski Method for the cold compression testing of metals without the effect of friction between the workpiece and the dies

Olavo Carvalho Haase, Adriano Amâncio Trajano, Alisson Duarte da Silva, Maria Teresa Paulino Aguiar e Paulo Roberto Cetlin (UFMG) Belo Horizonte - MG

FORJAMENTO 24

Influência da Trefilação na Dureza de Peças Forjadas – uma Análise Integrada do Processo

Bar Drawing Influence on Hardness of Forged Parts – an Integrated Analysis of the Process

Darlan V. Bayão, Túlio C. Nogueira, Geraldo M. M. e Ferreira Ana Luísa C. Barcelos (ArcelorMittal, Sabará-MG); Ermani V. O. Lima, Mariana M. da Silveira (ArcelorMittal, Monlevade-MG); Ricardo A. M. Viana, Rodrigo R. Lobenwein, Alisson S. Duarte (SIXPRO Virtual&Practical Process, Sabará-MG); Tiago N. Chalinski, Jones J. Ott, Guilherme S. Rolim, Wagner S. Soares, Rafael C. Gomes, Jói S. Theis, Allan G. Waskow, Roger F. da Silva, Douglas Martinazzi (Viemar Automotive);

FORJAMENTO 25

Eliminação de Vazios em Tarugos de Aço por Forjamento por Recalque

Void Elimination in Steel Billets through Upsettingextrusão

Pedro L. F. Perdigão, Renato C. dos Santos, Taíse Azevedo, Alisson S. Duarte e Pedro Henrique R. Pereira ((DEMET, UFMG / AÇOFORJA Brasil)

FORJAMENTO 26

O uso da simulação física no estudo e otimização dos processos de forjamento e estampagem a quente.
The use of physical simulation methods on the study and optimization of hot forging and hot stamping processes.

Fulvio Siciliano (Dynamic Systems Inc. – São Paulo, SP)

FORJAMENTO 27

Avaliação dos sistemas de lubrificação e seus lubrificantes no forjamento a frio

Lubrication systems evaluation and lubricants for the cold Forging industry

Marcia Beatriz Debatin, Luciano Pinotti (AÇOPEÇAS Ind. de Peças de Aço Ltda.); Edson Prust (ZWEZ Química do Brasil Ltda). Guabiruba-SC

FORJAMENTO 28

Soluções FICEP para a Indústria de Forja

FICEP solution for the Forging Industry

Gabriele Colombo (FICEP - Varese, Itália)

FORJAMENTO 29

Simulation-Driven Design for Metal Forming Processes: Advancements, Case Studies, and Future Perspectives

Stanislav Kanevskiy (QForm Group FZ LLC - United Arab Emirates); Nikolay Biba (Micas Simulation – UK); Andrey Vlasov e Jiawei Gu (Bauman Moscow State Technical University)



42° SENAFOR

26ª CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE FORJAMENTO - BRASIL
26TH INTERNATIONAL FORGING CONFERENCE - BRAZIL

FORJAMENTO 30

Avaliação de Ligas de Soldas - Revestimento de Matrizes

Evaluation of Welding Alloys - Die Cladding

Jose Santaella, José Santaella Redorat Jr (SANTEC Soldas)

FORJAMENTO 31

Rastreabilidade total no forjamento em matriz fechada

Full traceability in closed die forging

Flavio Sousa Braz de Araujo e Alison Foganhole (SMS group - Belo Horizonte, MG)

FORJAMENTO 32

Análise do processo de extrusão direta em tubos de aço sae 1010

Analysis of the direct extrusion process in sae 1010 steel pipes

Wagner Silveira Soares, Lirio Schaeffer (LdTM/CBCM – UFRGS – Porto Alegre-RS)

FORJAMENTO 33

Análise do Forjamento de Biela de Alta Resistência do Aço Microligado ao Vanádio 30MnVS6

Forging of High Strength Connecting Rod of Vanadium Microalloyed Steel Analysis

Andre Rosiak, Luana de Lucca de Costa, Thomas Gomes dos Santos, Diego Pacheco Wermuth e Lirio Schaeffer (LdTM/CBCM – UFRGS – Porto Alegre-RS)

FORJAMENTO 34

Análises Numérica e Analítica Aplicadas para a Otimização do Processo de Forjamento a Frio de Parafusos

Applied Numerical and Analytical Analysis for the Optimization of the Screw Cold Forging Process

Édipo de Almeida de Freitas, Thomas Gomes dos Santos, Diego Pacheco Wermuth, André Rosiak, Lirio Schaeffer (LdTM / CBCM/UFRGS – Porto Alegre -RS)

FORJAMENTO 35

Projeto e tolerâncias do produto forjado

Product Design Dimensions and Tolerances

Juliano de Souza da Silva, Santiago Blauth, Guilherme Oliveira Goulart, Cleiton Ariel Nunes (MAXIFORJA-Canoas-RS); Lirio Schaeffer (LdTM/CBCM /UFRGS- Porto Alegre -RS)

FORJAMENTO 36

Estudo e Análise do Processo de Forjamento através de Martelo de Queda

Study and Analysis of a Forging Process with the use of a Hammer.

Jerry A. Mendelski; Lucas Bandeira (GEDORE -São Leopoldo); Lirio Schaeffer (LdTM/CBCM – UFRGS) Porto Alegre RS

FORJAMENTO 37

Uma estrutura numérica “phase field” para estudar danos dúcteis na transição de fratura: uma aplicação a processos de conformação.

A phase-field numerical framework to study ductile damage to fracture transition: An application to material forming processes.

PINO MUÑOZ Daniel, BOUCHARD Pierre-Olivier, ELDAHSHAN Hazem, ALVES José and PERCHAT Etienne (MINES Paris, PSL Research University, CEMEF – France | Transvalor SA, France)

CHARACTERIZATION OF THE FRACTURE FORMING LIMITS IN BULK FORMING BY MEANS OF RADIAL EXTRUSION

Rui F.V. Sampaio^a, João P.M. Pragana^a, Ivo M.F. Bragança^b, Carlos M.A. Silva^a, Chris V. Nielsen^c and Paulo A.F. Martins^{a,}*

^aIDMEC, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal

^bCIMOSM, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa, Portugal

^cDepartment of Civil and Mechanical Engineering, Technical University of Denmark

First author. E-mail: rui.f.sampaio@tecnico.ulisboa.pt

Second author. E-mail: joao.pragana@tecnico.ulisboa.pt

Third author. E-mail: ibraganca@dem.isel.ipl.pt

Fourth author. E-mail: carlos.alves.silva@tecnico.ulisboa.pt

Fifth author. E-mail: cvni@dtu.dk

Corresponding author. E-mail: pmartins@tecnico.ulisboa.pt Telephone: +351218419006

ABSTRACT

This paper introduces a new formability test based on double-action radial extrusion to characterize material formability in the three-dimensional to plane stress material flow transitions that are found in bulk metal formed parts. The work was developed in a multidirectional tool, which was designed to convert the vertical press stroke into horizontal movement of the compression punches towards each other, and involved experimental strain determination, fractography and finite element analysis. Results show that the transitions to plane-stress at the flanges lead to different modes of fracture (by tension and by shear) that may or may not be preceded by necking, like in sheet metal forming. The new formability test also reveals adequate to characterize the failure limits of very ductile metallic materials, which cannot be easily determined by conventional upset compression tests, and to facilitate the identification of the instant of cracking and of the corresponding fracture strains by combination of the force vs. time and strain vs. time evolutions.

KEYWORDS

Formability test; Stress state transitions; Double-action radial extrusion; Digital image correlation; Fractography; Finite element method

1. INTRODUCTION

The fracture locus in bulk metal forming is commonly determined by means of upset compression tests performed on cylindrical and tapered specimens and is usually plotted in principal strain space (ϵ_1, ϵ_2) as a straight line with slope '-1/2' falling from left to right (Kuhn et al., 1973) (Figure 1). This line is the graphical representation of the positive and negative strain values that a material withstands at the onset of cracking by out-of-plane shearing, as it was recently proved by Martins et al. (2014), and earlier proposed by Kobayashi (1970) after observing that vertical and inclined cracks found on the outer surface of these specimens do not run radially.

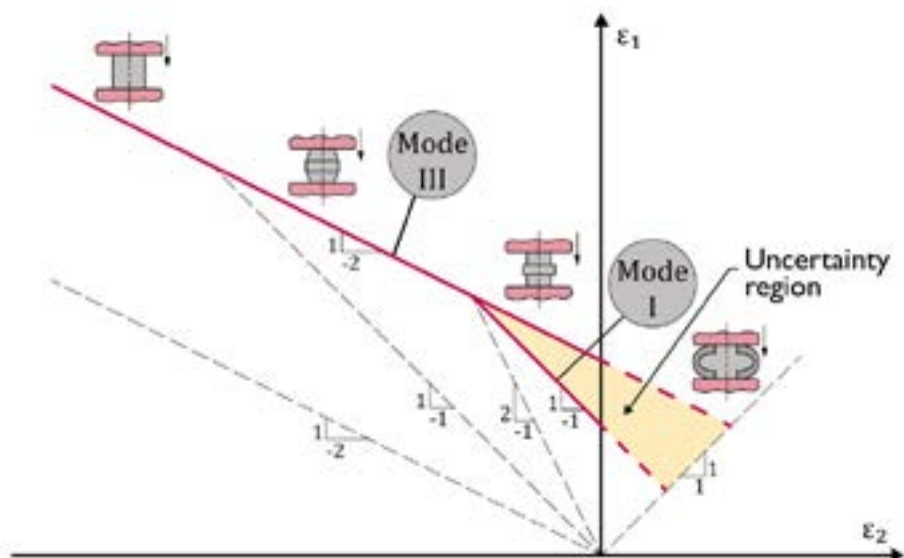


Figure 1 Bulk formability tests and fracture limit lines in principal strain space.

The proposal of a bilinear fracture locus in principal strain space (Erman et al., 1983) resulting from combination of the fracture limit line of slope '-1/2' with a second fracture limit line of slope '-1', is essential to match the strains at failure of the cylindrical and tapered specimens with those of the tensile and upset compression tests performed on rod and cylindrical flanged specimens. This second fracture limit line of slope '-1' corresponds to failure by tension (Atkins, 1996) and, in case of cylindrical flanged specimens, the

morphology of the cracks is consistent with the experimental observation of vertical cracks running radially at the outer surfaces (Magrinho et al., 2018).

Although the bilinear fracture locus is consistent with the experimental results obtained with the different formability test specimens, it gives rise to an 'uncertainty region' (refer to Figure 1) within which failure occurs by mixed modes resulting from competition between cracking by tension (mode I) and by out-of-plane shearing (mode III). This was recently confirmed by Sampaio et al. (2022), who designed a new test specimen to investigate the morphology of the cracks in the 'uncertainty region' of principal strain space and concluded that fracture was triggered by out-of-plane shearing (mode III) and propagate radially by tension (mode I).

Transitions from crack opening by mode I to propagation by mode III at the leftmost corner of the 'uncertainty region' were previously observed by the authors during upset compression of cylindrical flanged test specimens made from aluminum AA2030-T4 (Silva et al., 2015).

In view of the above, Sampaio et al. (2022) proposed a new ductile damage criterion based on combination of the Cockcroft and Latham (1968) criterion corresponding to crack opening by mode III with a modified version of the McClintock (1968) criterion commonly used in crack opening by mode I to model ductile damage over the entire range of stress-triaxiality values, including the 'uncertainty region' of crack opening by mixed modes.

Although research on formability and crack opening modes has been directly, or indirectly, associated with stress triaxiality and, sometimes, also with the Lode parameter (Xue and Wierzbicki, 2008), there are aspects related to material flow transitions that are not commonly taken into consideration. Accountability of these aspects means, in practical terms, to include the three-dimensional to plane stress material flow transitions in the list of parameters that are responsible for the competition between the different crack opening modes.

Figure 2 shows examples of bulk formed parts where plane stress is likely to occur in regions subjected to extensive plastic material flow, (refer to the pink colored regions of the solid rod flange, connecting rod and tube flange, where the final thickness t is much smaller than that of the preforms). The connecting rod is a good example of a well-known occurrence of three-dimensional to plane stress transitions when excess material flows into the flash gutter during impression-die forging.



Figure 2 Schematic representation of bulk forming parts exhibiting regions (refer to the pink color) where material flow takes place under plane stress conditions (solid rod flange, connecting rod and tube flange).

Under these circumstances, the main objective of this paper is to investigate formability in three-dimensional to plane stress material flow transitions by means of a new formability test based on the working principle of double-action radial extrusion (Balendra, 1985). As will be shown in the paper, depending on the aspect ratio and overall ductility of the specimens, the diameter-to-thickness ratio of the radially extruded flange may reach typical plane stress values, thereby allowing to analyze strain path evolutions and failure in three-dimensional to plane stress material flow transitions by means of digital image correlation (DIC), scanning electron microscopy (SEM) and finite element modelling.

However, the relevance of the new proposed formability test goes beyond the above-mentioned material flow transitions because it provides two significant advantages over the existing bulk formability tests. Firstly, it allows carrying out tests with very slender cylindrical specimens, which would inevitably collapse by buckling during upset compression tests between flat parallel platens. This overcomes the difficulty of obtaining

the experimental strains at fracture in very ductile materials, a topic that was also addressed by Bulzak et al. (2020) when studying damage evolution in hot forming with rotary compression tests. However, the experimental evaluation of surface strains becomes very difficult for this test, due to the continuous movement of the specimen.

Secondly, the fact that triggering and subsequent propagation of cracks in the double-action radial extrusion test will always lead to force drops in the force vs. time evolutions. This allows determining the instant of cracking and of the corresponding fracture strains by combination of the experimental force vs. time evolutions with the results obtained from digital image correlation. In fact, the force vs. time evolution of the double-action radial extrusion test is different from those found in conventional upset compression tests in which the combination of surface expansion with strain hardening commonly prevents the force from dropping at the onset of cracking.

2. EXPERIMENTATION

2.1. Material flow curves

The experimental part of this investigation made use of a soft aluminum AA1050-O and a medium strength aluminum-magnesium-silicon alloy AA6082 in the annealed (O) and solution heat-treated (T6) state. The materials were supplied in the form of solid rods and the flow curves were determined by means of compression tests carried out on cylindrical test specimens with 20 mm diameter and 20 mm height (Figure 3).

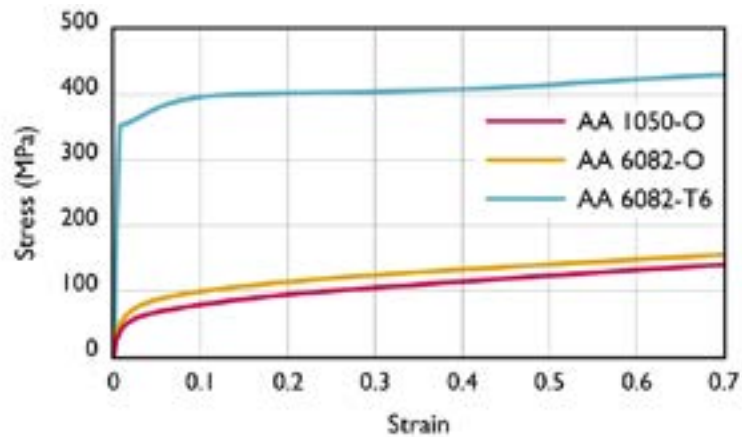


Figure 3 Flow curves of the aluminum AA1050-O, AA6082-O and AA6082-T6.

The compression tests were performed at ambient temperature on a Instron SATEC 1200 kN hydraulic testing machine with a constant cross-head velocity of 5 mm/min. The specimens were lubricated with molybdenum disulphide (MoS_2) to ensure near frictionless conditions.

2.2. Double-action radial extrusion formability test

The double-action radial extrusion formability tests were carried out in a multidirectional tool set that was designed by the authors. The tool set allows extruding specimens with different aspect ratios h/d_0 of the free gap height h to the initial diameter d_0 into the volume left between the two dies by compressing the material from two horizontal opposite sides in a single vertical press stroke.

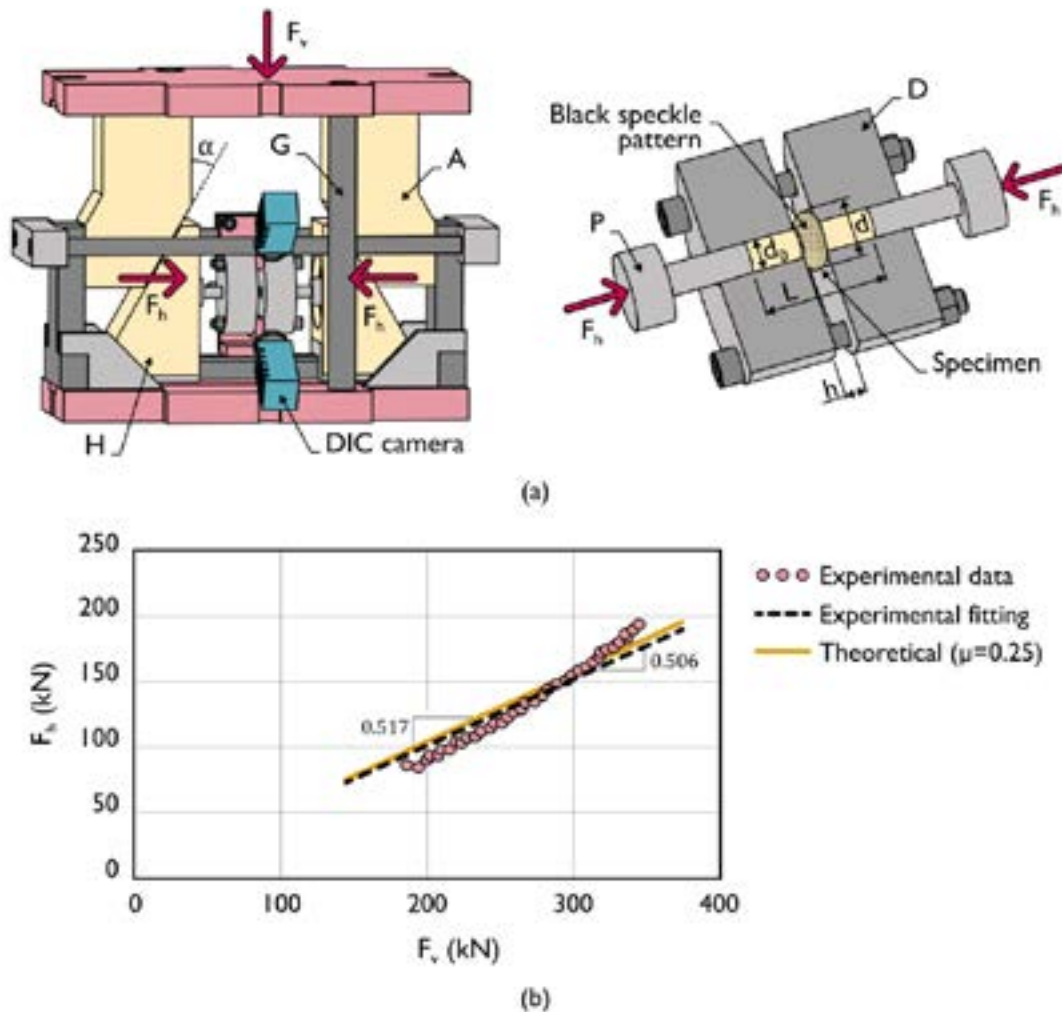


Figure 4 Double-action radial extrusion formability test. (a) Schematic representation of the tool set with details of the dies and punches, and showing the cameras used by the digital image correlation (DIC) system. (b) Experimental relation between the vertical F_v and horizontal F_h forces.

Figure 4a shows a detail of the tool set in which the movement of the compression punches (P) towards each other inside the dies (D) is obtained by means of two cam slide units consisting of a punch holder (H) and a die wedge actuator (A) with a working angle $\alpha = 30^\circ$. Two guided pillars (G) ensure the alignment between the upper and lower tool halves. The tool set was installed on the hydraulic testing machine that had been previously used to determine the material flow curves and the overall testing conditions are summarized in Table 1.

Table 1 Testing conditions utilized in double-action radial extrusion testing (nomenclature after Figure 4a)

Dies	
Gap height h	12 mm, 16mm, 32mm
Fillet radius r	0.5 mm
Punches	
Diameter	16 mm
Velocity	5 mm/min
Specimens	
Initial diameter d_0	16 mm
Initial length l_0	50mm, 90mm
Aspect ratio h/d_0	0.75, 1, 2
Material	AA1050-O, AA6082-O, AA6082-T6
Lubrication	Molybdenum disulphide (MoS2)

Force equilibrium across the cam slide units provides the following relation between the horizontal (F_h) and vertical (F_v) tool forces, where μ is the friction coefficient along the contact surfaces,

$$F_h = F_v \frac{\cos \alpha - \mu \sin \alpha}{2(\sin \alpha + \mu \cos \alpha)} = \begin{cases} 0.866 F_v, & \mu = 0 \\ 0.517 F_v, & \mu = 0.25 \end{cases} \quad (1)$$

Compression of cylindrical test specimens between straight parallel platens with the double-acting cam slide units and using a single-acting system in which the platens were fixed to the upper and lower bolsters of the tool set, allowed comparing equation (1) against experimental data. This is shown in Figure 4b for $\mu = 0.25$ and the differences at the upper right end are attributed to tool stiffness, elastic deformation, and friction along the surfaces of cam slide units. For this reason, a slope of 0.506 resulting from the black dashed linear trend line is used instead of the theoretical estimates with and without friction that are given in (1) to convert the vertical force F_v measured by the load cell into the horizontal applied force F_h .

2.3. Methods and procedures in formability analysis and fractography

The evolution of the in-plane strains with time $(\varepsilon_1, \varepsilon_2) = f(t)$ on the outer surface of the radially extruded flanges was obtained with a commercial digital image correlation (DIC)

system model Q-400 3D from Dantec Dynamics. For this purpose, the initial free gap height h of the specimens located in-between the two dies was painted in white and subsequently sprayed with a black speckle pattern (Figure 4a).

The double-action working principle of the proposed radial extrusion formability test facilitates image acquisition because the measuring window of the DIC system, (equipped with two 6-megapixels resolution cameras with 50.2 focal lenses and f/8 aperture), is fixed and always centered with the vertical symmetry line of the tool set during the entire duration of the test. A frequency of 10 Hz corresponding to 10 images per second was used. Transformation of the major and minor in-plane strain evolutions with time $(\varepsilon_1, \varepsilon_2) = f(t)$ obtained from DIC into the strain loading paths $\varepsilon_1 = f(\varepsilon_2)$ of principal strain space was carried out by combining and removing the time dependency from the individual evolutions of the major ε_1 and minor ε_2 in-plane strains. The procedure is schematically illustrated in Figure 5a.

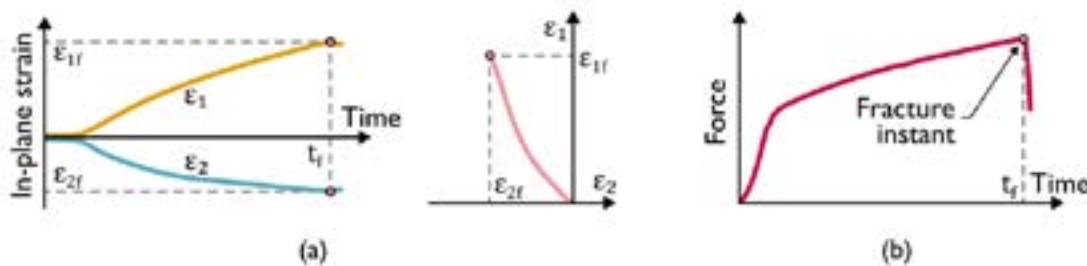


Figure 5 Methods and procedures involving experimental data in formability analysis. (a) Individual in-plane strain vs. time evolutions determined by digital image correlation (left) and the result of their combination to obtain the strain loading path in principal strain-space (right). (b) Identification of the instant of time at the onset of fracture from the force vs. time evolution.

The instant of time t_f at which cracks are triggered was obtained through identification of the sudden force drop in the experimental evolution of the radial extrusion force with time (Figure 5b), as earlier proposed by Magrinho et al. (2018). Once t_f is determined, the strains at fracture $(\varepsilon_{1f}, \varepsilon_{2f})$ are easily retrieved from the individual in-plane strain evolutions with time obtained from DIC (Figure 5a).

After testing, the fractured surfaces were cut out from the specimens for subsequent observation and analysis in a scanning electron microscope (SEM) model JSM-7001F from Jeol. Results are presented in the last section of the paper and provide a correlation between the morphology of the cracks, their opening mechanisms and the corresponding strain loading paths obtained from DIC.

3. NUMERICAL SIMULATION

The finite element computer program i-form was utilized to carry out the numerical simulation of the double-action radial extrusion formability test under the different operating conditions given in Table 1. The computer program is built upon the finite element flow formulation and was developed by the authors (Nielsen and Martins, 2021) to account for the three major sources of nonlinearity (material nonlinearity, changes of static and kinematic boundary conditions and geometric nonlinearity) that occur in the numerical simulation of metal forming processes.

The numerical simulation strategy utilized by the authors took advantage of the facility that i-form offers to exchange data between two-dimensional and three-dimensional models because experimental observations revealed that specimens undergo rotationally symmetric plastic deformation conditions up to approximately 30% of the total stroke. Only subsequently, with the occurrence of diffuse necking at the outer flange surface, there is evidence of asymmetric plastic deformation.

Figure 6 illustrates the overall numerical simulation strategy for a test specimen made from AA1050-O with the different stages carried out by the computer program being illustrated by means of three distinct images:

- (i) Figure 6a refers to the initial two-dimensional simulation under rotationally symmetric conditions in which the test specimen is modelled as a deformable object and discretized by means of quadrilateral elements. The dies and punches are

modelled as rigid objects and discretized by means of linear contact elements with friction,

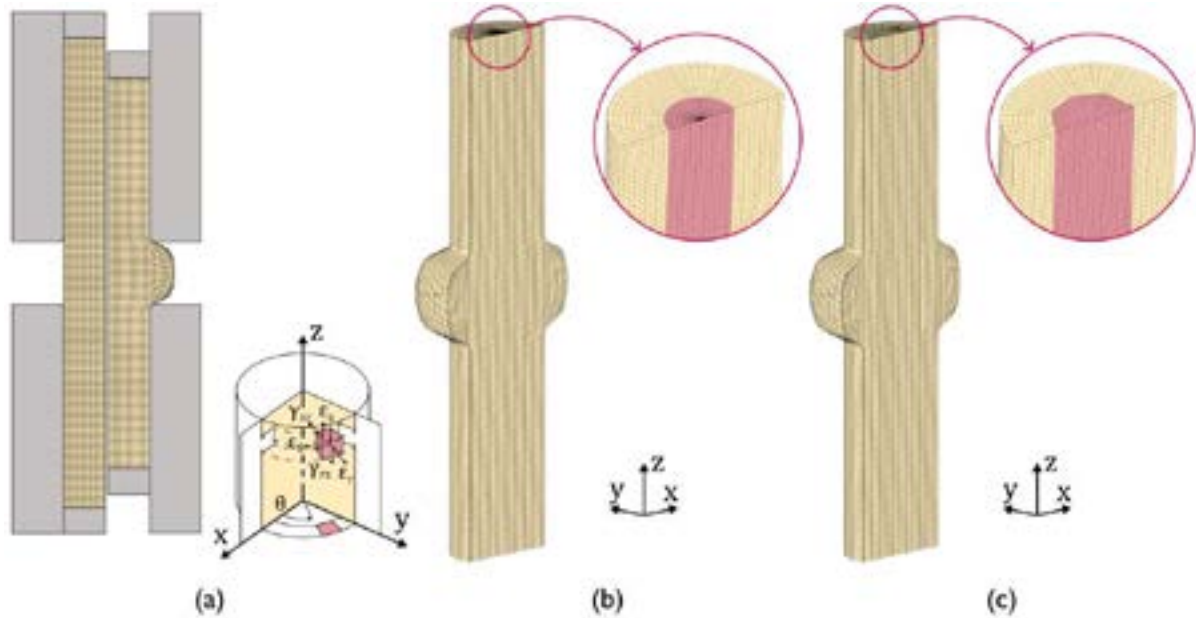


Figure 6 Methods and procedures utilized in the numerical simulation (AA1050-O with an aspect ratio $h/d_0 = 0.75$).

- (a) Initial and intermediate rotationally symmetric (2D) meshes,
 (b) Counterclockwise rotation of the intermediate rotationally symmetric mesh (a) into a temporary three-dimensional hexahedral mesh,
 (c) Automatic repairment of the temporary three-dimensional hexahedral mesh to obtain a hexahedral mesh without wedge-shaped elements along the z-axis,

- (ii) Once rotationally symmetric conditions can no longer be utilized, the quadrilateral mesh of the test specimen is automatically rotated counterclockwise about the z-axis to produce a temporary hexahedral mesh like that shown in Figure 6b. Scalar field variables are rotated accordingly but second-order tensors, like for example the strain tensor ε_{ij} , must be properly transformed as follows,

$$\varepsilon_{ij}^{xyz} = R^T \varepsilon_{ij}^{r\theta z} R \quad (2)$$

In the above equation the superscripts xyz and $r\theta z$ refer to the Cartesian and rotationally symmetric coordinate frames, respectively. The symbol R is the rotation matrix and θ is the angle of rotation shown in Figure 6,

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

(iii) The temporary hexahedral mesh contains a significant number of wedge-shaped elements (Martello, 2016) along the z-axis. These irregular elements are automatically eliminated and replaced by regular hexahedral elements with field variables properly transferred between the two meshes (Figure 6c). The resulting mesh is symmetric along the zx-plane because material was assumed as isotropic. The dies and punches resulting from the rotation of the axisymmetric finite element model continued to be assumed as rigid objects, but their contours were discretized by a mesh of spatial triangles with friction.

The main advantage of the interaction between two and three-dimensional finite element models is the CPU time saving during the first part of the numerical simulation in which specimens undergo rotationally symmetric plastic deformation. In fact, the CPU time between the two and three-dimensional models differs by an order of magnitude of approximately 40 times.

4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1. Strain-loading paths in principal strain space

Figure 7 shows the experimental evolutions of the major and minor in-plane strains with time determined by DIC and of the radial extrusion force with time after conversion of the vertical force measured by the load cell (refer to Section 2.2).

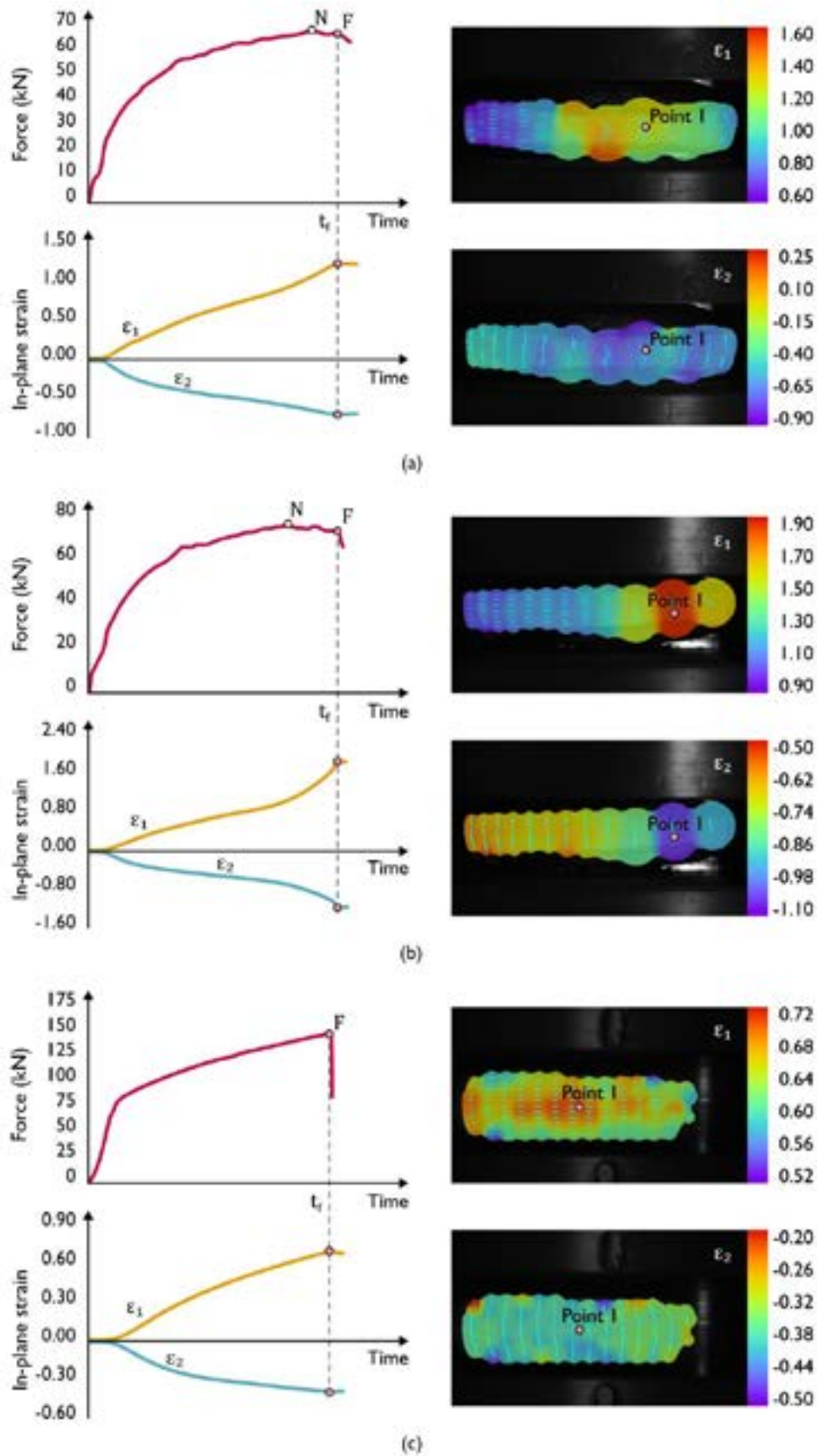


Figure 7 Experimental evolutions of the force with time and of the major and minor in-plane strains with time for specimens with an aspect ratio $h/d_0 = 0.75$ made from aluminum (a) AA1050-O, (b) AA6082-O and (c) AA6082-T6. The images were taken from DIC immediately before fracture in the location shown in Figure 4.

The in-plane strain evolutions were taken from the outer flange surface for the three different materials that were included in the testing conditions of Table 1. As seen, the instant of fracture t_f (refer to 'F' in Figures 7a-c) is clearly recognized by a sudden drop in force and allows determining the major ε_1 and minor ε_2 in-plane strains at fracture from their evolutions with time $(\varepsilon_1, \varepsilon_2) = f(t)$ obtained from DIC. Point 'I' is the location in the outer flange surfaces where the strain evolutions were obtained.

In case of the specimens made from aluminum AA1050 and AA6082 in the annealed (O) state, the instant of fracture is preceded by a change in the rate of force growth with time leading to the development of a neck on the outer flange surface (refer to 'N' in the force peaks of Figures 7a, b).

In contrast, the specimens made from aluminum AA6082-T6 only experience a sudden drop in force because cracking is not preceded by necking, as it was experimentally observed and will be shown in the last section of the paper.

Application of the methodology that was previously described in Section 2.3 allows plotting the corresponding strain loading paths $\varepsilon_1 = f(\varepsilon_2)$ in principal strain space. The result is shown in Figure 8 and allows distinguishing between monotonic and non-monotonic evolutions up to fracture thanks to the absence of necking (AA6082-T6) and to the sharp bends of the strain loading paths towards plane strain (AA1050-O) and pure shear (AA6072-O) deformation conditions that happen in the specimens where fracture is preceded by necking.

Finite element computed evolutions of the strain loading paths (refer to the dashed lines in Figure 8) show a good agreement with DIC results. However, the numerical estimates for the soft aluminum AA1050 and the medium strength aluminum-magnesium-silicon alloy AA6082 in the annealed (O) state are only given up to the onset of localized necking, which corresponds to approximately 80% of the total stroke. Beyond this point, the growth rate of the in-plane strains is very fast and the uncoupled finite element damage models utilized by

the authors experience difficulties in handling the non-homogeneous plastic deformation and the elastic unloading caused by damage-induced softening.

However, because the onset of localized necking and point 'F' occur almost instantly, finite elements will continue to be used in the following sections of the paper to analyze the deformation mechanics and the different modes of failure that were observed in the double-action radial extrusion formability test.

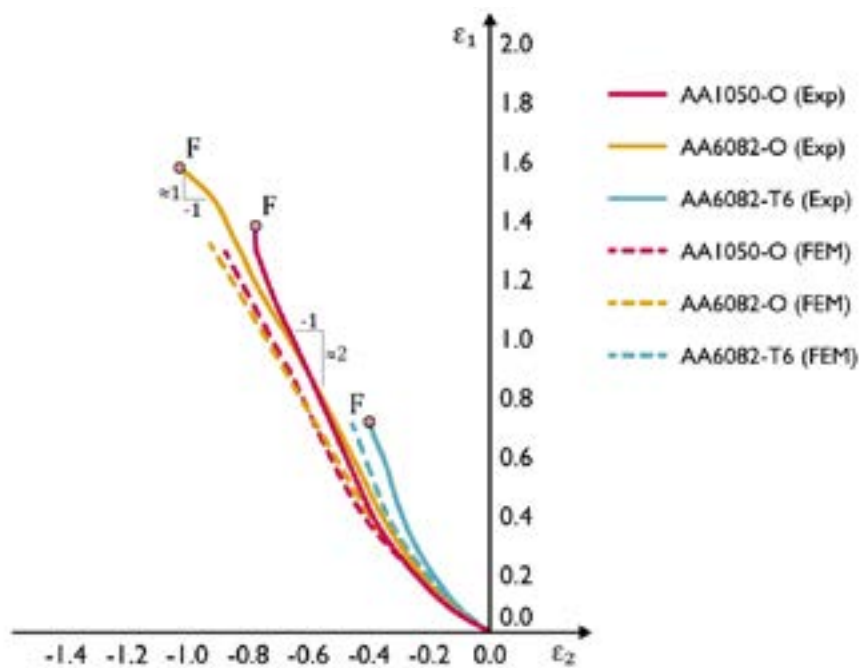


Figure 8 Experimental and finite element predicted strain loading paths in principal strain space for the three different types of specimens of Figure 7.

4.2. Deformation mechanics

Figure 9 shows the initial and intermediate rotationally symmetric meshes at 30% of the total stroke for specimens with an aspect ratio $h/d_0 = 0.75$ made from the different materials and supplied conditions that were utilized in the investigation. As seen in the predicted distribution of vertical stresses, the radially extruded flanges start showing signs of three-dimensional to plane stress material flow transitions at the outer flange surfaces, which will become more pronounced as radial extrusion continues and the flange diameter increases.

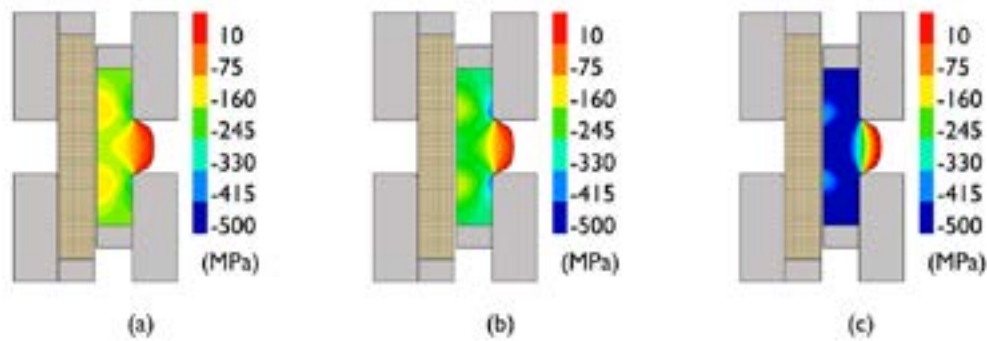


Figure 9 Initial and intermediate rotationally symmetric meshes with finite element predicted distribution of vertical stress for specimens with an aspect ratio $h/d_0 = 0.75$ made from aluminum (a) AA1050-O, (b) AA6082-O and (c) AA6082-T6.

The aspect ratio h/d_0 of the specimens plays a key role in the utilization of radial extrusion as a formability test capable of monitoring the three-dimensional to plane stress material flow transitions. In fact, larger aspect ratios than that shown in Figure 9, do not give rise to plane stress conditions (Figure 10a) and may result in material flaws (Figure 10b) or buckling, as reported in earlier investigations of the radial extrusion process (Balendra and Qin, 2004). In such situations not only the diameter-to-thickness ratio of the radially extruded flanges deviates from typical sheet forming values as plane stress conditions no longer prevail on the outer flange surface.

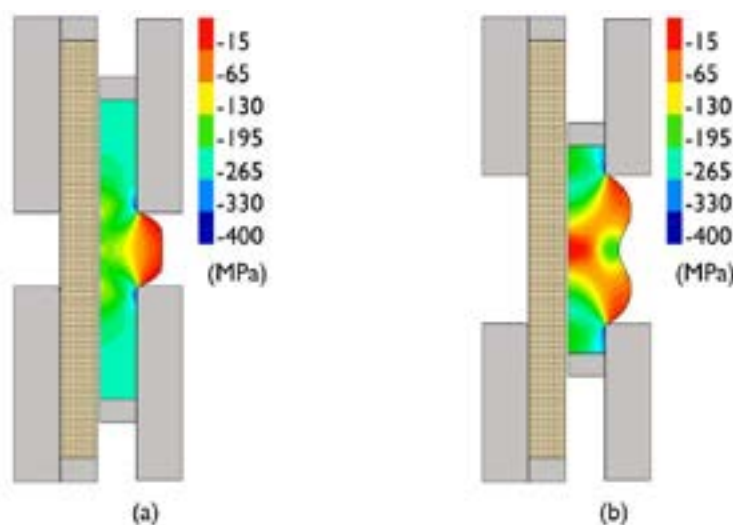


Figure 10 Initial and intermediate rotationally symmetric meshes with finite element predicted distribution of vertical stress for specimens with aspect ratios (a) $h/d_0 = 1$ and (b) $h/d_0 = 2$ made from aluminum AA1050-O.

The asymmetric deformation of the three specimens with an aspect ratio $h/d_0 = 0.75$ that progressively develops during the final stage of the double-action radial extrusion test was simulated with the three-dimensional finite element model built upon the interaction between two and three-dimensional models that was earlier described in Section 3. For this purpose, the authors artificially imposed small gauge imperfections of approximately 0.2 mm on the outer flange diameter located at the vicinity of the xz -plane. These imperfections account for less than 1% of the flange diameter and correspond to localized material weaknesses that resemble those utilized by Marciniak and Kuczynski (1967) in their theory of plastic instability in sheet metal forming.

The result of the above-mentioned strategy combined with intermediate remeshing operations aimed at replacing elements with excessive distortion at the center of the specimens made from AA1050-O and AA6082-O is disclosed in Figure 11. As seen, finite element computed geometries obtained shortly after the onset of cracking agree well with the experimental test specimens (refer to the enclosed photographs).

Incipient crack propagation was numerically modelled by means of an element deletion (removal) technique based on the critical value of a damage function D ,

$$D = \int_0^{\bar{\epsilon}} g d\bar{\epsilon} \quad (4)$$

where g is a weight function (Atkins, 1996) and $\bar{\epsilon}$ is the effective strain. Two different weight functions were used: (i) the McClintock (1968) stress triaxiality ratio $g_{Mc} = \sigma_m/\bar{\sigma}$, corresponding to failure by tension (mode I), where σ_m is the hydrostatic stress and $\bar{\sigma}$ is the effective stress (Figure 11a) and (ii) the Cockcroft-Latham (1968) normalized principal stress ratio $g_{CM} = \sigma_1/\bar{\sigma}$, corresponding to failure by out-of-plane shear (mode III), where σ_1 is the major principal stress (Figures 11b, c).

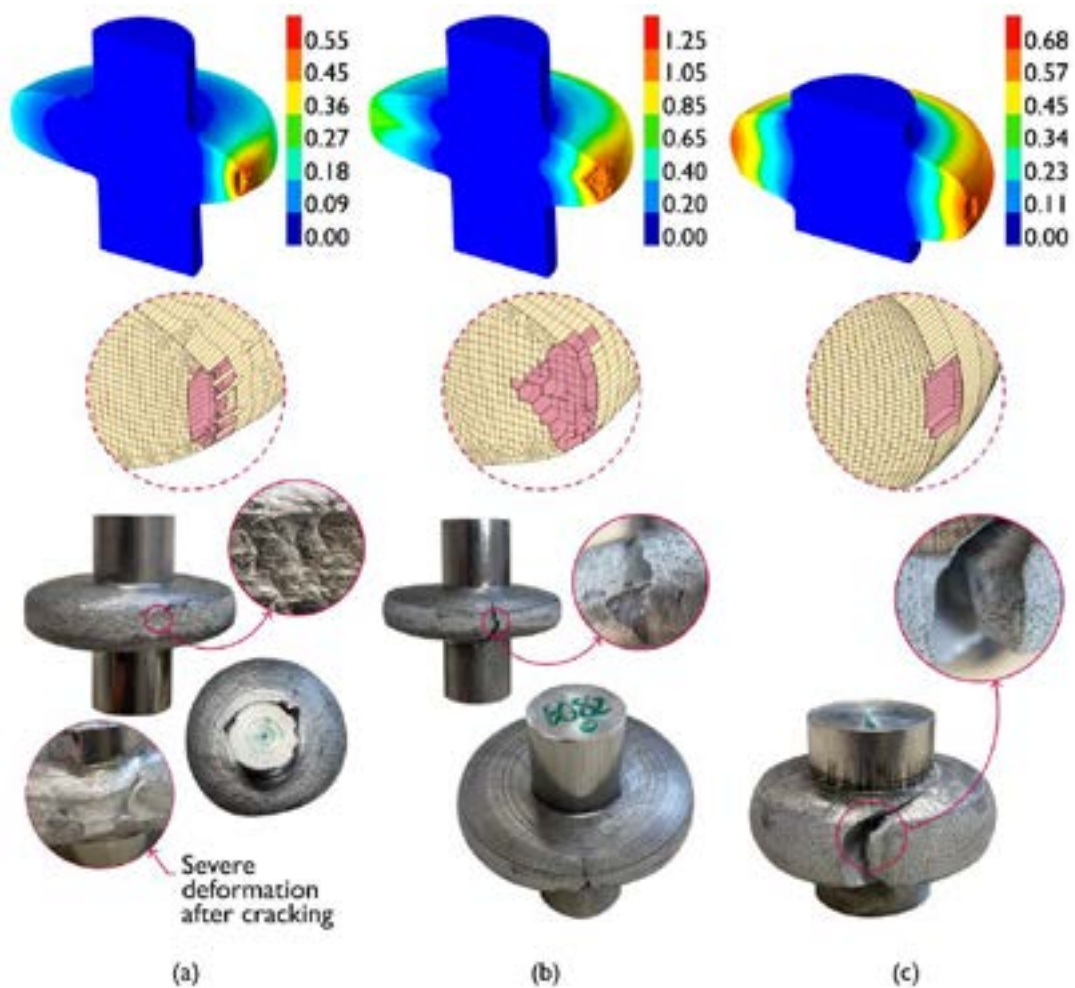


Figure 11 Three-dimensional finite element prediction of ductile damage with mesh details showing cracks on the outer flange surfaces for three different test specimens with an aspect ratio $h/d_0 = 0.75$ made from aluminum (a) AA1050-O, (b) AA6082-O and (c) AA6082-T6. Ductile damage was calculated according to (a) McClintock (1968) and (b, c) Cockcroft-Latham (1968) criteria and photographs of the specimens are enclosed for comparison purposes.

The choice between the proper weight function g to be used for each test case was based on the strain loading path evolutions disclosed in Figure 8, which clearly indicate failure by tension preceded by necking in AA1050-O, by out-of-plane shear preceded by necking in AA6082-O and failure without previous necking in AA6082-T6.

Further observation of the two different types of necks combined with fractography analysis by means of scanning electron microscopy (SEM) to be presented in the next section provides a better identification and understanding of the different types of failure and modes of deformation that are likely to occur in three-dimensional to plane stress material flow transitions.

4.3. Necking and fractography

Combination of the finite element computed meshes with the images obtained from DIC and SEM (Figure 12) allows concluding that fracture in the outer surface flange of the AA1050-O test specimens is by tension (mode I). Results also show evidence of plastic instability in the form of diffuse (Figure 12a) and localized necking (Figure 12c) in good agreement with the deformation mechanics of sheet forming. In fact, the localization of the neck along a direction inclined at an angle of approximately 53.2° (Figure 12c) to the circumferential direction value is very close to the theoretical estimate of 54.7° (Figure 12b) obtained for a sheet (plane stress) specimen made from an isotropic material, subjected to uniaxial tension (Hill, 1948).

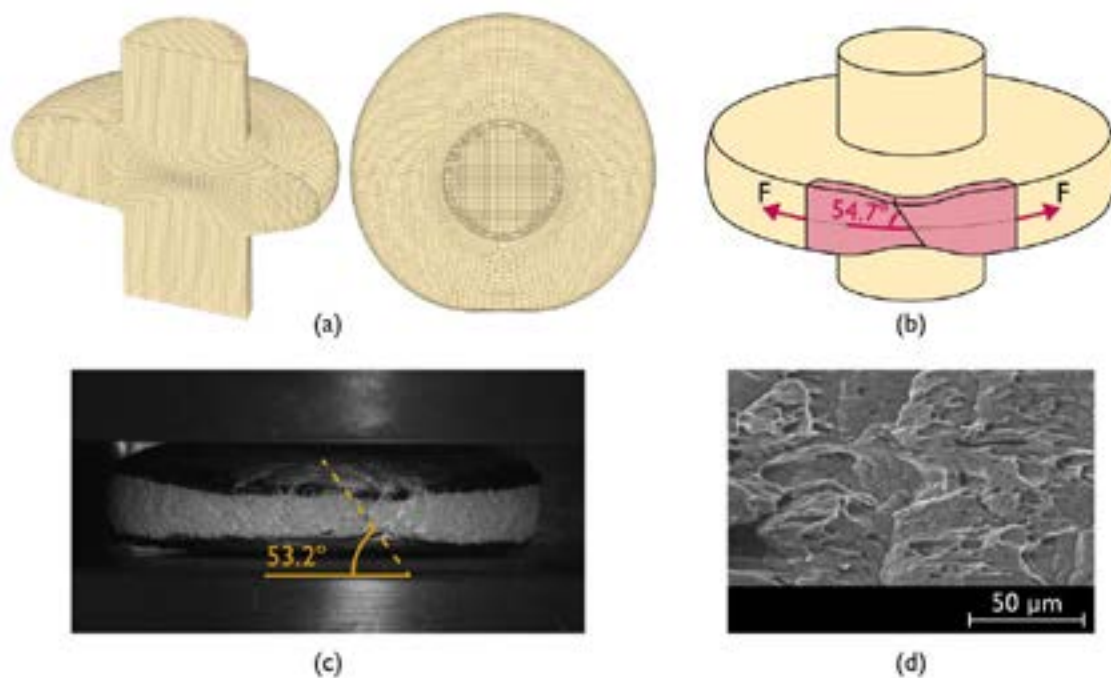


Figure 12 Failure mode of the aluminum AA1050-O test specimen with an aspect ratio $h/d_0 = 0.75$ showing (a) the computed finite element mesh, (b) the analogy with localized necking in uniaxial tension of a sheet test specimen, (c) a DIC image showing localized necking at the outer flange surface and (d) a SEM picture showing the morphology of the cracks.

The morphology of the cracks consists of circular dimple-based structures (Figure 12d), and further corroborates the experimental observation of cracks opening by tension (mode I) and running radially along the flange.

Application of the same methodology for the specimens made from AA6082-O (Figure 13a) confirms that vertical cracks opened by shear stresses due to the occurrence of smooth parabolic dimple-based structures (Figure 13e). Moreover, these cracks do not run radially along the flange (refer to Figure 11b), as it is commonly observed in the upset compression of cylindrical and tapered test specimens, due to significant distortion of outer flange surface placed within the neighborhood of the localized neck. All this is consistent with the strain path bend towards pure shear in principal strain space (refer to Figure 8) before failing by through-thickness shearing (mode III).

The pure shear stress state acting at the outer flange surface (with $\varepsilon_\theta = -\varepsilon_z > 0$) gives rise to plane strain deformation along the radial direction ($\varepsilon_r = 0$) due to material incompressibility. Thus, assuming these conditions to hold in-between the top and bottom flange surfaces due to combination of small thickness and plane stress material flow conditions (refer to Section 4.2), an analogy with uniaxial tension of a sheet test specimen can also be made.

The analogy requires a similar approach to that taken for the specimen made from AA1050-O but now with diffuse necking taking place in the radial direction (Figures 13b and 13c) and crack opening in the r - θ plane after the occurrence of localized necking with angles of approximately $54^\circ \sim 55^\circ$ (refer to the top flange view in Figure 13d).

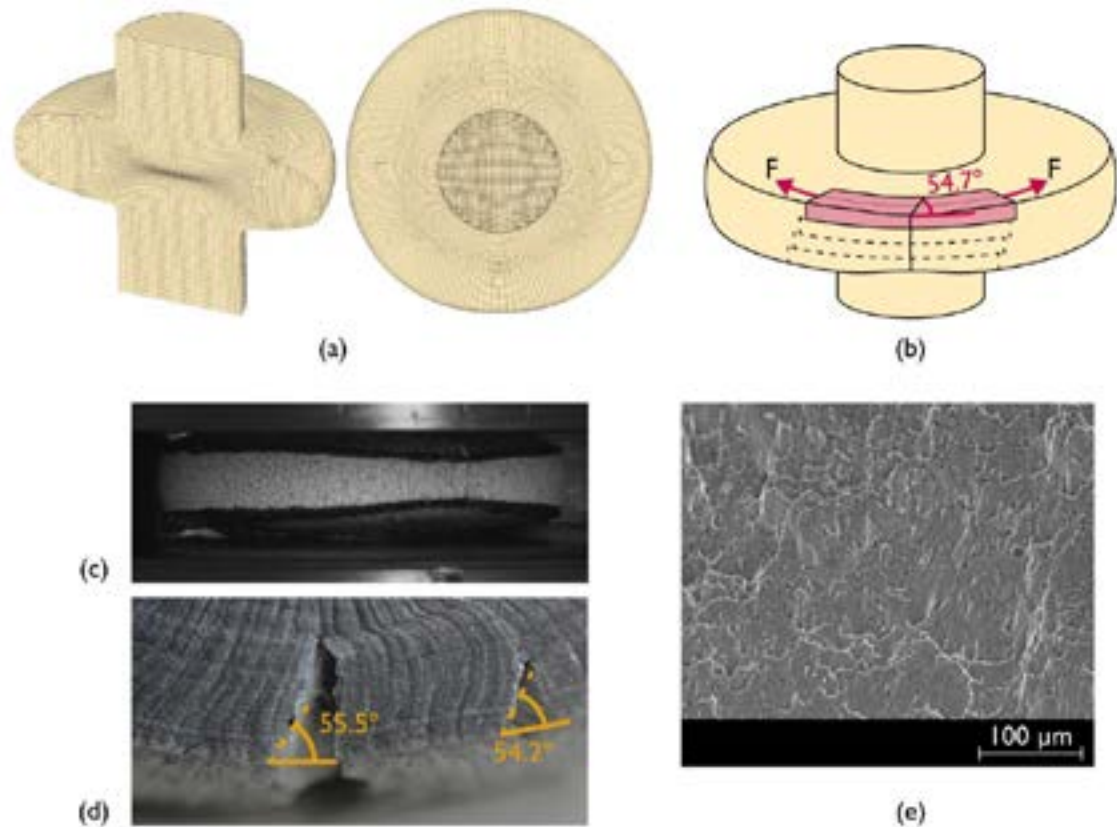


Figure 13 Failure mode of the aluminum AA6082-0 test specimen with an aspect ratio $h/d_0 = 0.75$ showing (a) the computed finite element mesh, (b) the analogy with pure shear within the neighborhood of the localized neck, (c) a DIC image showing localized necking along the longitudinal direction at the outer flange surface, (d) top view detail of the flange near the neck showing crack opening on the $r-\theta$ plane with angles and (e) a SEM picture showing the morphology of the cracks.

In what concerns the results obtained for the specimens made from AA6082-T6 (Figure 14a) it is possible to conclude that vertical cracks open without previous necking (Figure 14c). Crack propagation does not run radially, as it is schematically disclosed in Figure 14b, due to the development of a mixed mode characterized by the simultaneous occurrence of circle and smooth parabolic dimple-based structures (Figure 14d).

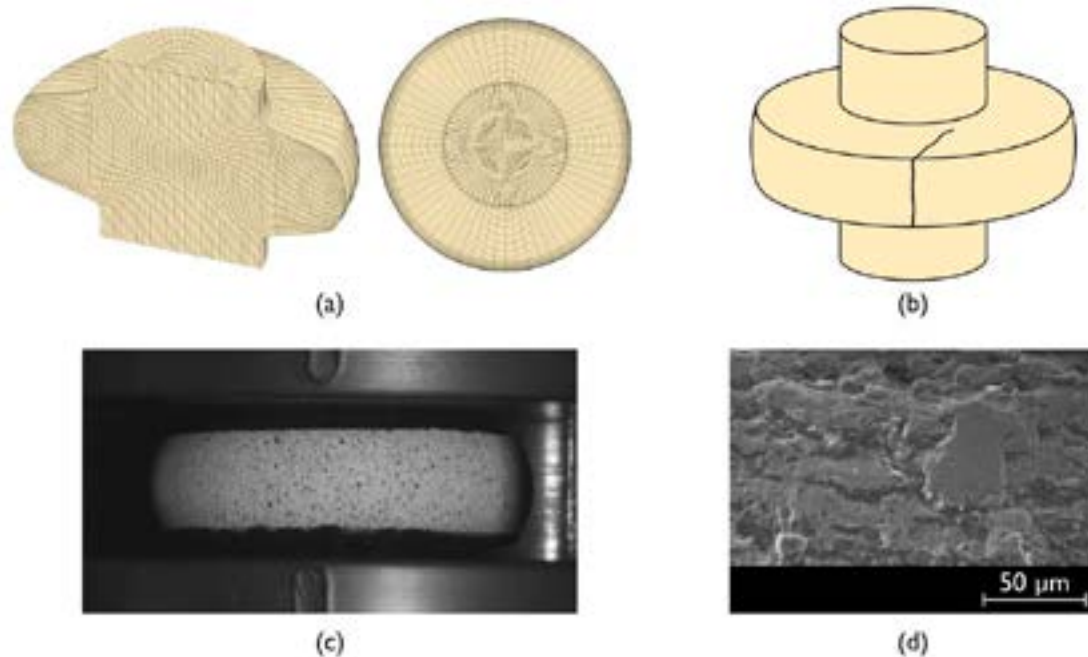


Figure 14 Failure mode of the aluminum AA6082-T6 test specimen with an aspect ratio $h/d_0 = 0.75$ showing (a) the computed finite element mesh, (b) a scheme showing vertical cracks that do not propagate radially, (c) a DIC image showing the absence of necking at the onset of cracking and (d) a SEM picture showing the morphology of the cracks.

5. CONCLUSIONS

The work on the utilization of double-action radial extrusion as a new formability test led to the following main conclusions:

- The test can be successfully used to characterize material formability in the three-dimensional to plane stress material flow transitions that are commonly found in bulk metal formed parts,
- Material flow transitions give rise to uniaxial tension states of stress that eventually lead to crack opening with or without previous localized necking,
- Cracks preceded by localized necking develop under plane strain or pure shear material flow conditions on the outer flange surface,
- The morphology of the cracks reveals crack opening by tension (mode I), by shear (mode III) and by a mixed mode resulting from combination of modes I and III,
- Triggering and subsequent propagation of cracks in the new proposed test always leads to force drops in the force vs. time evolutions, thereby allowing an easy identification

of the instant of cracking and of the corresponding fracture strains by combination of the force vs. time evolutions with the in-plane strains obtained from digital image correlation,

- The new test facilitates image acquisition because the measuring window of the DIC system is fixed and always centered with the vertical symmetry line of the tool set during the entire duration of the test,
- The new test is also adequate to characterize the formability limits of very ductile materials with large fracture strains, such as aluminum AA1050-O and AA6082-O, which cannot be easily determined by conventional upset compression tests.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to acknowledge the support provided by Fundação para a Ciência e a Tecnologia of Portugal and IDMEC under LAETA- UIDB/50022/2020 and PTDC/EME-EME/0949/2020.

REFERENCES

- Atkins AG (1996) Fracture in forming. *Journal of Materials Processing Technology* 56: 609–618.
- Balendra R (1985) Process mechanics of injection upsetting. *International Journal of Machine Tool Design and Research* 25: 63-73.
- Balendra R and Qin Y (2004) Injection forging: engineering and research. *Journal of Materials Processing Technology* 145: 189-206.
- Bulzak T, Pater Z, Tomczak J et al. (2020) A rotary compression test for determining the critical value of the Cockcroft–Latham criterion for R260 steel. *International Journal of Damage Mechanics* 29(6): 874–886.
- Cockroft MG and Latham DJ (1968) Ductility and the workability of metals. *Journal of the Institute of Metals* 96: 33–9.
- Erman E, Kuhn HA and Fitzsimons G (1983) Novel test specimens for workability testing. In: Chait R and Papirno R (eds.) *Compression Testing of Homogeneous Materials and Composites*. West Conshohocken, PA: ASTM International, pp. 279–90.
- Hill R (1948) A theory of yielding and plastic flow of anisotropic metals. *Proceedings of the Royal Society, London, Series A* 193:281–297.
- Kobayashi S (1970) Deformation characteristics and ductile fracture of 1040 steel in simple upsetting of solid cylinders and rings. *Journal of Engineering for Industry* 92(2): 391–8.

- Kuhn HA, Lee PW and Erturk T (1973) A Fracture criterion for cold forming. *Journal of Engineering Materials and Technology* 95(4): 213–218.
- Marciniak Z and Kuckzynski K (1967) Limit strains in the process of stretch-forming sheet metal. *International Journal of Mechanical Sciences* 9: 609–620.
- Martello G (2016) Discretization analysis in FEM models. In: Murgul V. (ed.) *International Scientific Conference Week of Science in SPbPU - Civil Engineering*, Saint-Petersburg, Russia. MATEC Web of Conferences 53, 01063,
- Magrinho JP, Silva MB, Alves LM, et al. (2018) New methodology for the characterization of failure by fracture in bulk forming. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design* 53 (4): 242–247.
- Marciniak Z and Kuczyński K (1967) Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal. *International Journal of Mechanical Sciences* 9(9): 609–620.
- Martins PAF, Bay N, Tekkaya AE, et al. (2014) Characterization of fracture loci in metal forming. *International Journal of Mechanical Sciences* 83: 112–123.
- McClintock FA (1968) A Criterion for ductile fracture by the growth of holes. *Journal of Applied Mechanics* 35(2): 363–71.
- Nielsen CV and Martins PAF (2021) *Metal Forming: Formability, Simulation, and Tool Design*. 1st ed. New York: Academic Press.
- Sampaio RFV, Pragana JPM, Bragança IMF, et al. (2022) Revisiting the fracture forming limits of bulk forming under biaxial tension. *International Journal of Damage Mechanics* 31: 882-900.
- Silva CMA, Alves LM, Nielsen CV, et al. (2015) Failure by fracture in bulk forming. *Journal of Materials Processing Technology* 215: 287-298-
- Xue L and Wierzbicki T (2008) Ductile fracture initiation and propagation modeling using damage plasticity theory. *Engineering Fracture Mechanics* 75: 3276–3293.



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil

26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de

Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming

Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis

12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

Digitization of cold extrusion processes using a combination of free-fall part monitoring with AI-controlled axial punch position

T. Deliktas ⁽¹⁾

J. Böhm ⁽²⁾

D. Alba ⁽³⁾

M. Liewald ⁽⁴⁾

ABSTRACT

In the digitalization of bulk metal forming production processes, the utilization of sensors greatly influences specific process knowledge and understanding. Moreover, data collection can improve the efficiency of the process in diverse forms, such as automation, environmental footprint improvement and reduction of scrap production. Further, the implementation of sensors and its acquired data aids to analyze long-term trends in production which are a helpful tool for support in case of product recalls. In this paper, several digitalization topics are addressed in a holistic form. The investigations target the link between specific production data and the corresponding produced part as well as a mark-free identification allied to measurement of cold forged parts during free fall through an inspection sphere. This feature, a so-called individual part fingerprint, is derived from the metallic microstructure, the lubricant distribution and the material flow. In parallel, the component dimensions are recorded during measurement. This tool is specifically useful for analyzing long-term trends as well as short-term monitoring solutions. Further, this system can perform process monitoring in order to actively control the forming equipment aiming the reduction on scrap production. The focus of this work specifically lies on the ramp-up phase at the beginning of batch processing, during which scrap occurs due to unsteady thermo-mechanical conditions. The aim is to reduce scrap through AI-based control of the axial punch position. Through the use of AI techniques, control

⁽¹⁾ M.Sc. Tahsin Deliktas, Institute for Metal Forming Technology (IFU), University of Stuttgart, tahsin.deliktas@ifu.uni-stuttgart.de

⁽²⁾ M.Sc. Jonathan Böhm, Institute for Metal Forming Technology (IFU), University of Stuttgart,

⁽³⁾ M.Sc. Diego R. Alba, Institute for Metal Forming Technology (IFU), University of Stuttgart,

⁽⁴⁾ Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c Mathias Liewald MBA, Institute for Metal Forming Technology (IFU), University of Stuttgart,

parameters are gathered and the training data is collected and stored with the help of an inspection sphere. In order to actively control the forming process, the punch position will be controlled by a newly developed wedge adjustment device. Therefore, the data collected from the inspection sphere provides geometry measurements and an individual fingerprint for each part enabling a precise way to minimize and track scrap parts individually.

Key words — cold forging, process control, digitalization

1. INTRODUCTION

Digitalization in bulk metal forming aims to improve the effectiveness and efficiency of batch processes. One of the main objectives is to support companies in their strategic strive for economic and ecological benefits. In this context, this paper provides an overview of two different research projects performed at the Institute for Metal Forming Technology at the University of Stuttgart. Both projects aim to significantly improve metal forming technology through progressive process digitalisation. A common goal of both projects is to reduce CO₂ emissions in batch production through the enhancement of digitisation in cold forging by combined use of inline measurement technology and individual part tracking. Studies in order to improve quality and performance, replace machining processes or to achieve higher precision in cold forming are benefits of the methods presented in this paper. Central aspect of this objective is an inspection sphere equipped with 16 cameras, developed by the Fraunhofer Institute for Physical Measurement Techniques (Fraunhofer IPM). This inspection sphere digitizes, inspects and identifies workpieces during free-fall movement after the forming process. The identification is based on characteristic and individual surface structures for each workpiece, which are formed as a result of the manufacturing process history. Therefore, these projects aim to deliver an automated demonstrator system installed on a serial forming press that enables full-process digitisation at the individual part level. Combining this inspection sphere with a newly developed wedge adjustment device, working as an actuator, active adjustments are possible at each individual press stroke resulting in a superior part quality and more stable process. The association of the monitored data from the inspection sphere with additional simulation data to predict control parameters, enables to establish an AI-based control system to stabilize process parameters. Moreover, the wedge adjustment device enables mechanical punch positioning control and is therefore suitable for general strategies to improve product geometry tolerances. Finally, studies aiming to stabilize the ramp-up phases in cold forging are performed, in which a large number of rejects are discarded, significantly reducing the economic efficiency and sustainability of cold forging processes. The ramp-up phases occur, without exception, at every production start in cold forging processes. This is due to non-steady thermal conditions in the tool and in the press. In summary, based on the individual part data collected by the inspection sphere, a control system is implemented in the batch process to stabilize the production process. This active control is possible through AI calculations and a wedge adjustment system controlling the punch position during forming.

2. STATE OF THE ART

In production engineering, cold forging represents a key technology due to high output quantities of components with high surface quality and increased operating properties [1]. In 2018, a total of 2,404,000 tons of cold formed components were manufactured in Germany [2] such as fasteners (e.g. bolts and nuts), elongated components with undercuts (e.g. gear shafts) and hollow, toothed components. [3]. A large quantity of components is rejected, particularly in the process ramp-up phase. Reasons for this are insufficient shape and dimensional accuracy of the workpieces due to the transient thermal-mechanical conditions that occur at the early stages of production. During the process ramp-up, the entire system consisting of tool, lubricant, blank and press increase its temperatures, which has several consequences for the forming process. For instance, this increase in temperature can result in thermal expansion of mechanical tool components [4], thermally-induced change in system stiffnesses [5], change in tribological system properties [6] and change in thermal heat transfer [7].

These factors influence each other in various ways. The temperature increase in the forming process results from friction and material deformation and is directly transferred to the tool system. As a result of the increasing tool temperature, both the tool and the press expand thermally due to heat conduction. Therefore, the tool and press change their shape and dimensional accuracy as well as their mechanical stiffness [8]. The rising temperature during processing results also in a tribological change in terms of a reduced friction factor [6]. The ramp-up of the process ends autonomously, as seen on Figure 1, when the generated and dissipated heat during processing achieve a steady-state. After reaching a quasi-stationary process temperature above room temperature, the process is stable and, therefore, good parts can be produced [9].

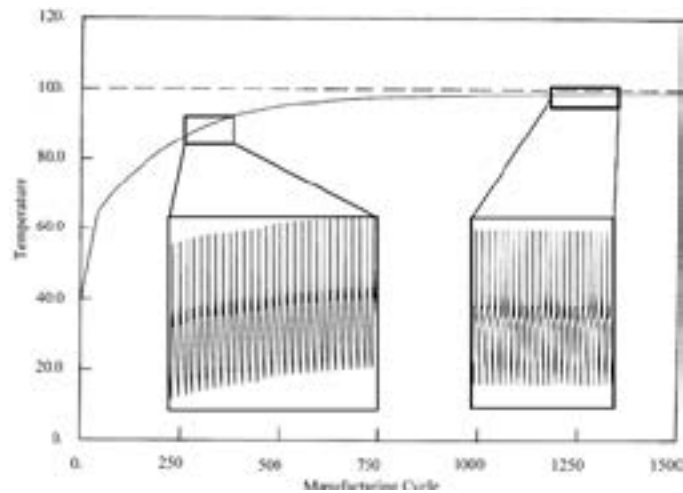


Figure 1: Temperature progression on the die operating surface during the process ramp-up phase [9].

In order to minimize scrap production during the process ramp-up, an effective process monitoring and control are essential. Process monitoring in cold forging often relies on press force measurements. By analysing the press force curve, thermal-induced changes in press and tool components can be identified. Normally, tool positioning adjustment for compensation of thermal effects can only be made during a production stop by manual setting of a conventional wedge adjustment [9]. Modern cold forging companies additionally use piezoelectric sensors for the detection of tool vibrations, indicating early wear or breakage [10]. Further, camera-based inspection systems are used for production control [11,12].

Improving product quality in forming technology requires a clear assignment of process information to the physical workpiece, which enables a root cause analysis for quality deviations. This allows process steps in the production chain to be adapted in order to reduce scrap and improve the robustness of the process. Current approaches for part tracking in forming technology are limited to marking techniques such as radio frequency identification, labelling, needle marking, laser engraving and virtual marking. The challenge with RFID and labels is application, storage and removal. Needle marking and laser engraving locally change the component geometry and surface properties in the marking zone [13]. In this context, Fraunhofer IPM has developed a process that can uniquely identify components without additional markings solely on the basis of their individual surface microstructure. The process is called "Track & Trace Fingerprint" (in short: fingerprint) [14]. Within the scope of the project, the technology is to be assigned to the formed components during free fall movement.

3. DESIGN OF THE TEST TOOL WITH WEDGE ADJUSTMENT

3.1 Experimental tool

The experimental forming tests of both projects are performed on a vertical servo-mechanical press with a max. press force of 5.000 kN (Schuler MSL 1-500-0,85-500) at the Institute for Metal Forming Technology (IFU) at the University of Stuttgart. The automated experimental tool shown in Figure 2 was developed for synchronous cold forging and subsequent ejection for three forming operations. The tool frame has four column guides and three dies with an outer diameter of $\varnothing 160$ mm can be mounted in the lower part of the frame. A specially developed ejector system is used to distribute the force of the press's central table ejector to the three forming stages of the tool frame. The ejector system consists of a solid bridge part guided by two column guides. Three ejector bolts are located above this bridge part and each of them is equipped with a mechanically preloaded force measuring ring (Kistler 9061A, up to 200 kN) to enable measurement of the ejector forces. Furthermore, three strain gauge-based load cells are installed in the tool frame for punch force measurement. Additionally, two thermocouples are inserted into the dies of all three forming stages in order to measure the die temperatures near to the actual process. A stroke rate of 25 strokes/min was used for the experimental investigations. The automation, as shown in Figure 2, consists of a control panel, conveyor belts, a pneumatic part separator and a gripper transfer unit. After the forming test, the pressed parts are transferred to the inspection sphere and then they are dropped through the inspection sphere.

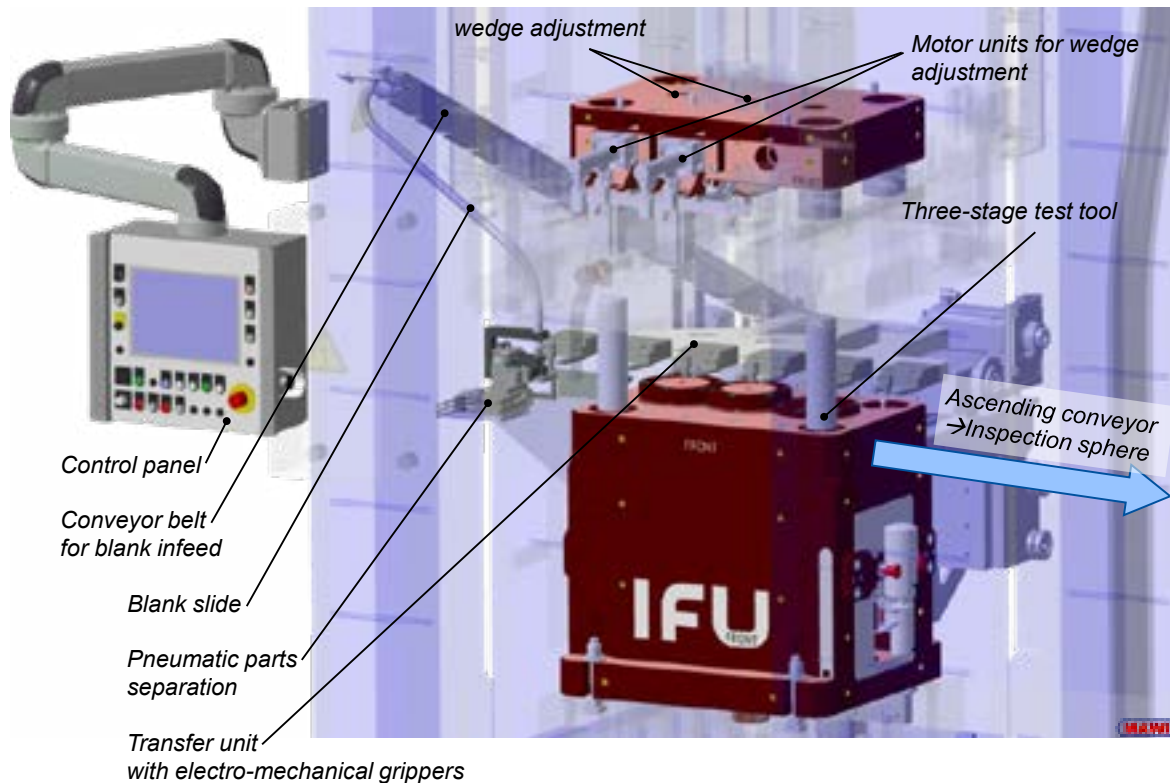


Figure 2: Schematic of the automated experimental setup for a multi-stage cold forging process.

3.2 Wedge adjustment unit

Figure 3 illustrates the integrated motor-driven wedge adjustment system which is used in two forming stages of the experimental tool. The novel wedge adjustment device was developed at IFU for rapid punch position adjustments. This self-locking system includes various wedges (illustrated in Figure 3) and is placed between the press ram and die punch. The compact device, which operates in a closed-loop setup, ensures precise punch positioning under load. A special feature of this new wedge adjustment system is the combination of several stacked wedges, which results in extremely precise adjustability within sub-micrometre dimensions. As shown in b, the central wedge (I), which is linked to the motor-powered spindle, drives two other wedges (II) horizontally. The third wedge (III) then moves vertically. The vertical punch position changes are limited to 0.5 mm. Moreover, the punch position control will be performed by a machine learning approach, using numerical and experimentally data as training data.

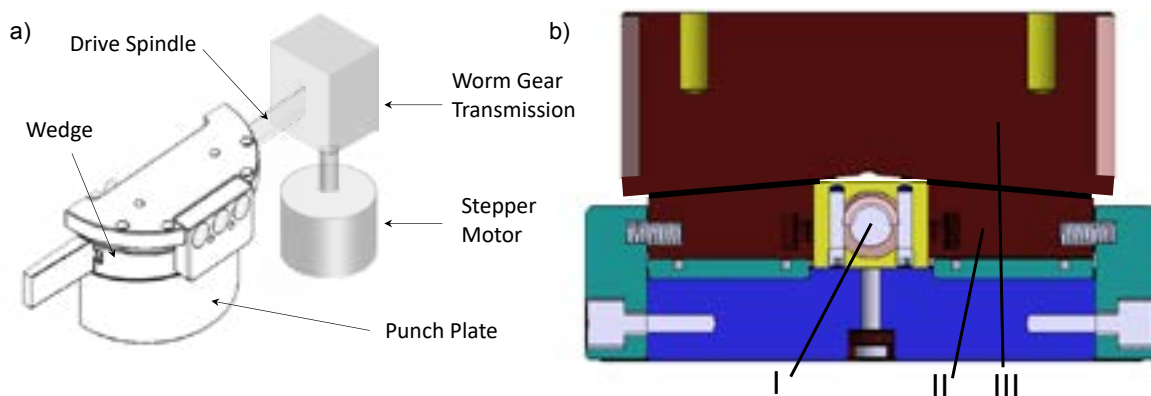


Figure 3: a) Wedge adjustment system consisting of several wedges connecting a stepper motor via a spindle with the punch, b) detailed assembly of the wedge adjustment system.

3.3 Inspection sphere

In order to provide geometrical data and part tracking in real time, the Fraunhofer Institute for Physical Measurement Techniques (Fraunhofer IPM) developed an inspection sphere for the planned demonstration project, which is depicted in Figure 4. It consists of two hollow sphere shells connected in their horizontal separation plane. Light barriers are located at the two openings in the horizontal parting plane of the inspection sphere, which are used to trigger the cameras. For the optical observation of parts, the inspection sphere is equipped with a total of 16 high-resolution cameras. Two LED rings (40 A, 3.2 kW) at the two openings of the test sphere provide a shadow-free, diffuse illumination of the component during the free fall movement. This special lighting features are necessary to provide an image without motion blur since the available observation time is short. A pneumatic separator for the parts is located below the inspection sphere for sorting out the rejected parts. During the development of the inspection sphere, the arrangement of the cameras has been optimised and a suitable calibration body has been defined. The calibration body with Charuco patterning is used for camera calibration and enables detection of the orientation of the press part in relation to a global coordinate system. Fraunhofer IPM is working together with the project partner Visometry GmbH on software-based processing of the acquired data from the inspection sphere. Initial tests suggest that fingerprints for unambiguous identification of the components can be detected in less than 0.1 s and can be reduced to a file size smaller than 10 kB. Recognition of the Fingerprint ID can probably be realised within one second, depending on the number of components to be distinguished. The inspection sphere can currently detect test objects from minimal dimensions of 5 x 5 x 5 mm up to a maximum of 60 x 60 x 60 mm within 0.2 s. Finally, the equipment also detects surface defects such as cracks or scratches up to a size of minimum 30 µm.

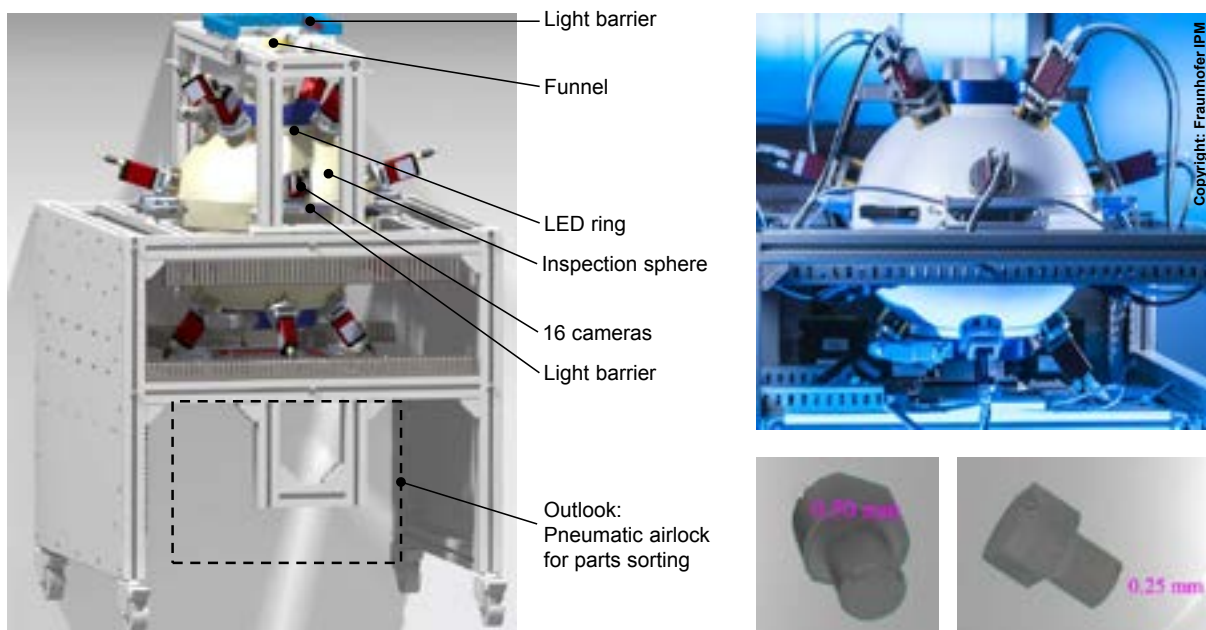


Figure 4: Design of the Fraunhofer IPM inspection sphere, bottom right: exemplary images of components in free fall. Artificially generated impact points were detected and deviations from the CAD model quantified.

4. INVESTIGATIONS ON RAMP-UP PHASES IN COLD FORGING

4.1 Preliminary experimental investigations of single-stage cold extrusion processes

The process ramp-up phase is part of the investigation for both projects presented in this paper. Therefore, preliminary investigations were conducted to analyse the process behaviour within such production phase. To that, numerical and experimental methods were used in order to obtain data and establish a deeper understand of the correlation between process parameters and parts dimensions.

In order to gather initial experimental data within the process ramp-up phase, an automated single-stage cold forging process was investigated. Since, for this particular process, the control for compensating the ramp-up phase is only related to the position adjustment of the punch, the backward cup extrusion was selected as a suitable test process. The selection of such geometry relies on the fact that, due to the higher tribological loads during processing, the punch will increase its temperature faster. This increase in temperature directly affects the punch length and the resulting variation of the dimensions of the punch can be determined by the measurement of the base thickness of the formed part. Backward cup extrusion tests were performed with billets made of C15 steel at a constant stroke rate of 9 strokes/min. During the tests, the punch force, the punch stroke and the die temperature were measured. Measurement of the die temperature was conducted using a type K thermocouple placed 2 mm below the active die surface within a bore hole.

Figure 5 shows the measurement results from the experimental investigation of the automated forming process. Figure 5a illustrates the characteristic “saw tooth shaped” profile for the evolution of the punch force and the tool temperature. This profile results from the cyclic backward cup extrusion at 9 strokes/min, whereby the

peaks in the diagram represent the maximum thermal and mechanical load per stroke. While the maximum punch force is generally constant within the recorded process time of about 500 s, a continuous increase of the tool temperature can be observed. Starting from room temperature at process initialisation, a rapid increase of tool temperature was detected within the first 50 strokes. Subsequently, the slope of the temperature curve decreases and converges to a saturation temperature of approximately 65 °C, which can be considered as the tool temperature steady-state. A comparison of the temperature curve with the geometric measured values of the cup base thickness (see Figure 5b) shows a correlation between both measurements. Since the die and punch heat up during the continuous run, the decreasing cup base thickness can be attributed to the thermal elongation of the punch. The cup base thickness decreases by a total of 1.5 % due to the increasing process temperature and the resulting elongation of the punch. Based on these measurement data, a steady-state process condition and thus the end of the process ramp-up phase after the extrusion of approx. 250 components could be achieved. Based on this preliminary investigation, the first data within a process ramp-up phase were measured to estimate the adjustment range of the wedge adjustment, the range for saturation of the die temperature during cold extrusion and the progression of part geometry changes.

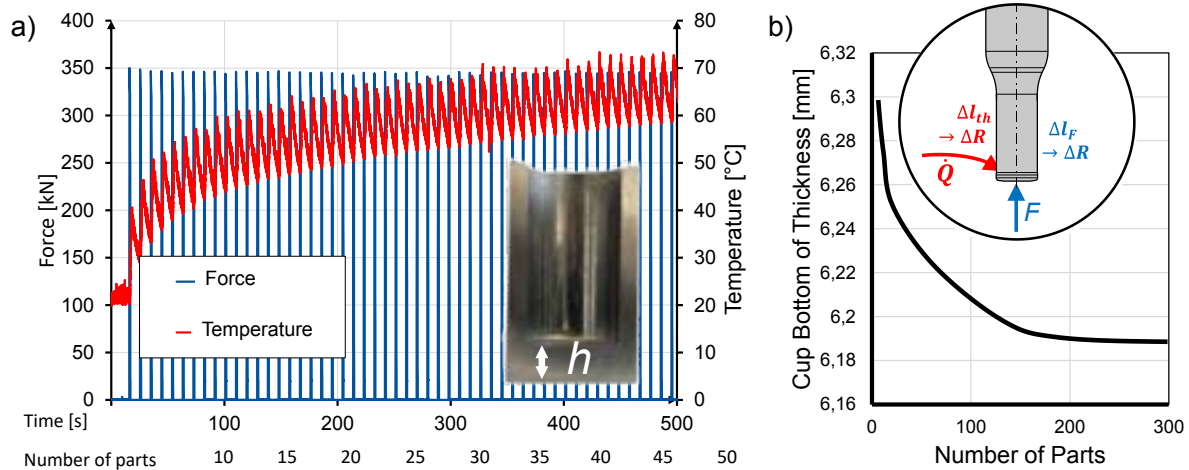


Figure 5: Measurement results of the endurance test with backward cup extrusion with material C15, a) punch force and die temperature, b) cup base thickness.

Numerical investigations of ramp-up phases of multi-stage cold extrusion processes

4.2 Simulation setup

Both projects are intended to demonstrate their objective in an industry-related process. Therefore, a multi-stage cold forging process for a screw-like workpiece was chosen as a demonstrator process and modelled in the FE software Deform2D™. Prior to designing and dimensioning the process sequence, a press part geometry was defined that meets the requirements for both projects. A requirement for such a test bench geometry is a flat surface on the workpiece in order to detect and define a Fingerprint ID. Furthermore, a non-rotationally symmetrical shape on the workpiece was required in order to determine the orientation of the workpiece within the inspection sphere (pose) from the pictures. Figure 6b shows the workpiece with the main dimensions Ø23 mm x 30 mm for the planned forming experiments within laboratory conditions at IFU. The lateral surface of the screw head is flattened on two opposite sides, which favours a pose estimation around the component axis. In the simulation, the screw head was represented in a simplified way as a rotationally symmetrical workpiece. This allows for a lower calculation time since it is a two-dimensional simulation and on the other hand the resulting error is marginal.

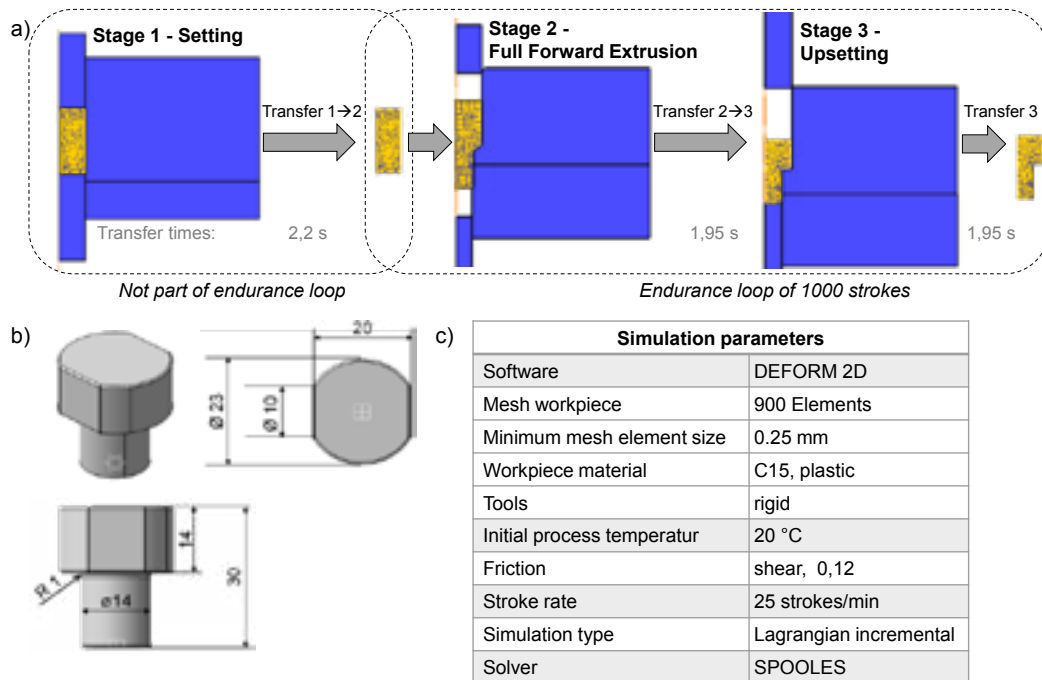


Figure 6: Numerical investigations on multi-stage cold extrusion process, a) Simulation setup, b) final workpiece, c) simulation parameters.

The cold forging process was simulated by using the model setup (Figure 6a), part geometry (Figure 6b) and simulation parameters (Figure 6c). In the 2D simulation model shown, all three forming tools are defined as rigid objects, with the plastic workpiece made of C15 steel being transferred from one forming operation to the next. In order to most accurately simulate the process, the workpiece transfer was performed as a "heat transfer" in Deform2D™, whereby the workpiece releases heat to the environment due to convection and radiation within a given time period. The punch movement was done by implementing the measured ram movement profile of the servo-mechanical forming press installed at IFU for a stroke rate of 25 strokes/min. Due to the high computational effort, the numerical calculation to determine the die temperature of multi-stage cold forging dies could not be performed with simultaneous forming in all three forming stages. Therefore, single workpieces were virtually moved through the process sequence one after the other, whereby thermal processes of non-involved tool components were stopped. Consequently, the tool temperatures of non-involved tool components were saved temporarily and subsequently loaded into the forming process of the next part. Since hardly any heat is introduced into the forming tool during the first forming stage (Setting), this stage was initially performed, and thereafter an already formed workpiece was continuously passed into the endurance loop (stages 2 and 3). A total number of 1000 forming cycles were simulated in the endurance loop.

4.3 Simulation results

Numerical results on tool temperature from the endurance forming test are summarised in Figure 7. Figure 7a depicts the temperature profiles of specific points during full forward extrusion within 1000 forming strokes. At the measuring points P1 to P4 it can be seen that the initial tool temperature is 20 °C and a saturation temperature of 57 °C is reached after about 450 forming strokes. The peaks per stroke are caused by the introduced heat by the workpiece due to the forming process, with the workpiece reaching a maximum core temperature of 195 °C. In the course of this numerical investigation, the tool temperature was also determined for the third forming stage, the head upsetting. The tool temperature profile determined at the measuring points P1 to P4 within 1000 forming strokes is shown in Figure 7b. It can be seen that the tool temperature reaches an apparent saturation temperature of about 59 °C within approximately 650 forming strokes. Furthermore, the elastic behaviour of the tool components was investigated under consideration of the tool temperature profile after 1000 forming strokes within the framework of an elastic-plastic simulation of the individual tool stages. It was found that the corresponding tool temperature profile led to an increase of the elastic radial die widening by 1.9 µm in the full forward extrusion process and by 3.5 µm in the head upsetting stage compared to the initial tool temperature of 20 °C.

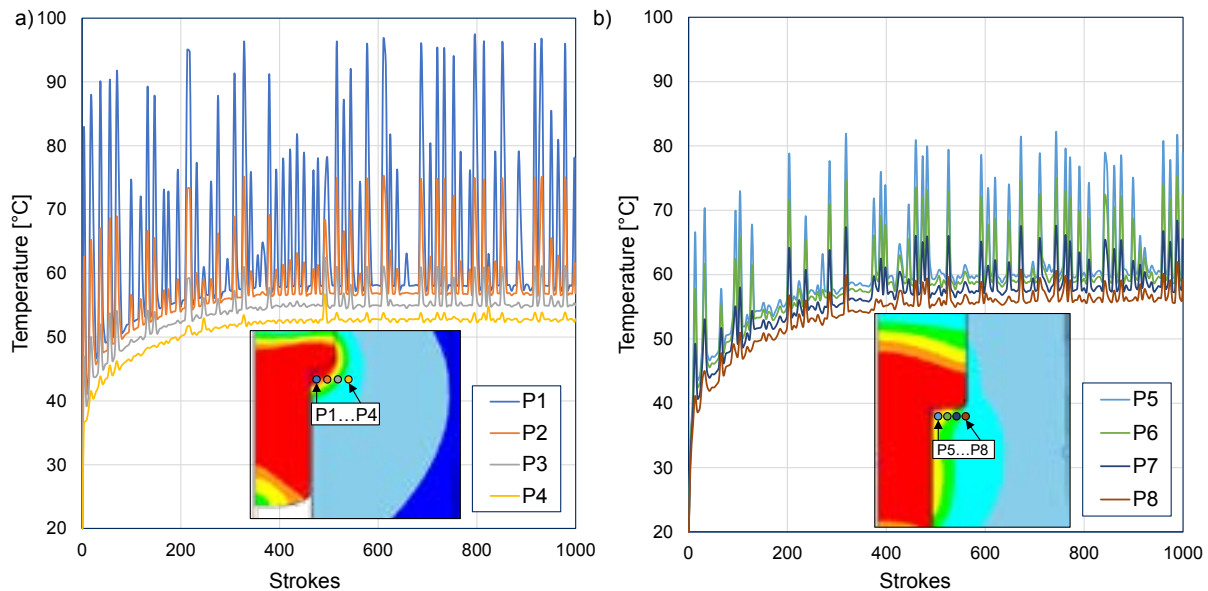


Figure 7: Numerical results of die temperature profiles from the endurance run simulation in Deform 2D™, a) Full forward extrusion, b) Head upsetting.

5. APPROACH TO COMBINE THE USE OF THE INSPECTION SPHERE AND THE WEDGE ADJUSTMENT CONTROL

In principle, there are two different strategies to stabilize production processes and to decrease the duration of ramp-up phases in cold forging processes: 1) quickest process stabilization or 2) continuous adjustment of the process conditions. The quickest stabilization of ramp-up phases strategy aims to avoid transient process conditions during the ramp-up phase by any means. To achieve this, there are several ways, e.g. pre-heating of tools, pre-heating of blanks or the smart combination of tool materials which may reduce any thermal expansion during production. Moreover, strict control of all process conditions with minimal tolerances and a small margin for errors due to statistical effects as well as minimized human impact can lead to a short ramp-up phase.

The strategy of continuous adjustment approaches the challenge of transient conditions by recognizing the effects of the ramp-up phase, statistical effects in the process and material as well as human influences. This strategy aims to adjust to any changes affecting product quality. Mechanically or electrically driven actuators and intelligent data processing can lead to short ramp-up phases and stable processes. Different types of actuator systems for thermomechanical tool expansion compensation are known, e.g. actuators, that induce stresses with the help of elastomer inlays in tools or by hydraulic pressure. Tool parts based on the effects of shape memory alloys or dies with active thermal management are ways to continuously affect process conditions as well [15, 16, 17].

The continuous adjustment of processes to reduce the ramp-up phase offers a promising solution, as it can be implemented for different types of processes using an appropriate control strategy. Such strategies require a continuous acquisition and evaluation of all relevant process data and component dimensions of each individual part. Ideally, the measurement data evaluation must be performed in real time in order to obtain the shortest adjustment times and, therefore, fast compensation of the ramp-up phase. This type of evaluation can be provided by the novel inspection sphere from Fraunhofer IPM. Under these circumstances, a project concept is currently under implementation at IFU, which combines both project approaches consisting of 100 % component control with the inspection sphere (see Figure 4) and motor-driven control of the thermal punch elongation using the new wedge adjustment unit (see Figure 3). The principle idea is illustrated in Figure 8. This idea consists of using the measurement data from the inspection sphere for a computer-assisted evaluation and deriving a setting value for the control of the wedge adjustment unit. In the course of this evaluation, trends and correlations between the process and part data can be detected and presented to the machine operator in a clear and understandable way. Based on this evaluation, conventional or AI-based control systems can then be used to output a set value for adjustment of the punch position (Δz_1 and Δz_2 in Figure 8).

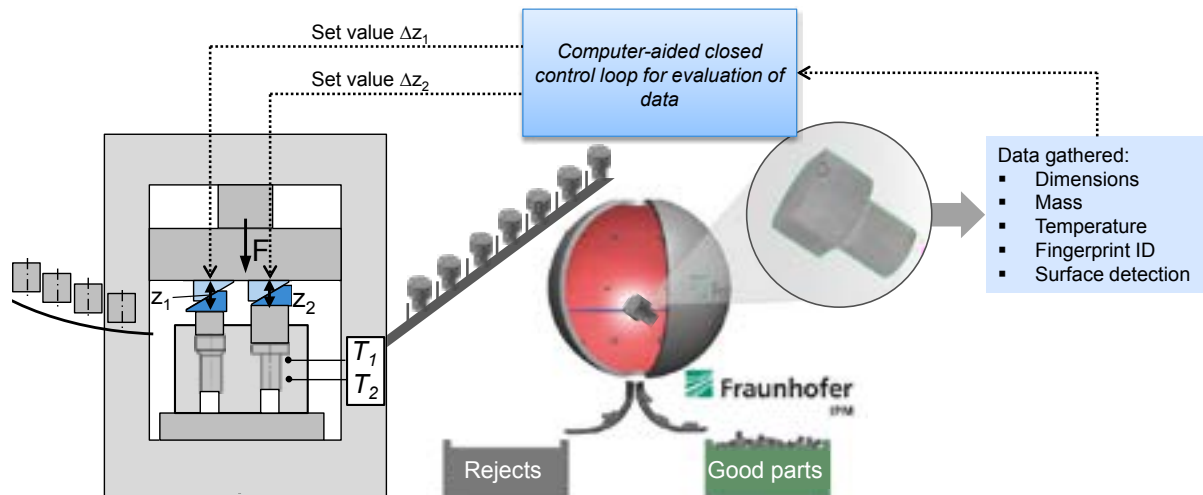


Figure 8: Principle concept for the combined use of inspection sphere observation of workpieces and wedge adjustment control

The new approach to the progressive digitalisation of cold forging processes offers high potential for industrial implementation and can contribute for the global reduction of CO₂ emissions in production technology. The advantages of such an approach are the compact dimensions of the wedge adjustment unit, which allow integration into a variety of forming presses. Also, due to its flexibility, the inspection sphere can be used for various types of workpieces. By implementing this system into a real production process, near zero scrap production could be achieved through successive optimisation, which would maximise material utilisation in cold forging. Furthermore, all workpieces could be identified by a characteristic surface structure, the fingerprint ID. Workpieces that would fail during operation could be identified retroactively by the inspection sphere, which could help to find the cause for the workpiece failure based on the process data assigned to the fingerprint ID of the workpiece. Likewise, the reduction of scrap production would increase the economic efficiency of the cold forging process. In addition, the long-term use of this technology would lead to a substitution of existing machining production shares.

6. SUMMARY & OUTLOOK

In this paper, a new integrated system to improve cold forging batch processing is presented. Using a demonstrator cell for an automated cold extrusion process of a screw-like components, the benefits of an inspection sphere to monitor and identify the pressed parts is shown. For each individual part, process data can be recorded and assigned to a part's individual fingerprint. Through the connection of the process data with the unique part fingerprint, the scrap parts can be easily separated from good parts which can support manufacturers during product recalls. Meanwhile, the process data can be used for training of an AI-based system aiming an active control of the process. Further, to improve the production process, a novel actuator system is proposed which comprises several wedges and allows for an adjustment of the punch position in between strokes, enabling a compensation on the part geometry. The objective of this control system is to reduce scrap production based on thermal non-stationary process conditions. Based on this idea, a large potential for the digitization of cold forging and for the global reduction of CO₂ emissions can be outlined. Overall, using an automated self-learning AI-based control system is beneficial to the whole manufacturing product chain. This is the first step towards a self-improving production system correcting faults and enabling the forging companies to be more competitive through production optimization.

ACKNOWLEDGMENT

This paper presents two different research projects. The Project "GUmProDiG" is funded by the "Technologietransfer-Programm Leichtbau (TTP LB)" of the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK); funding code FKZ03LB3008. The project "ramp-up phases" is funded by the "Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen" (AiF, Industrial Collective Research), project number IGF 21635 N. The authors would like to thank the BMWK and the AiF for founding and supporting both research projects.

LITERATURE

- [1] K. Lange and M. Kammerer, *Fließpressen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [2] Euroforge, "2017-2018 European survey," p. 2018, 2018.
- [3] M. Hirschvogel, P. Kettner, G. Linder, M. Dahme, D. Landgrebe, and H.-W. Raedt, "Kaltmassivumformung: Präzision in Serie," *Kaltmassivumformung Präzision Ser.*, 2012.
- [4] K. Kuzman, "Problems of accuracy control in cold forming," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 113, no. 1–3, pp. 10–15, 2001.
- [5] H. Long, "Dimensional errors of cold formed components using FE simulation," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 151, no. 1–3 SPEC. ISS., pp. 355–

- 366, 2004.
- [6] C. Müller, P. Groche, O. Oehler, P. Scherzinger, and M. Twickler, "Temperamentstehung und die tribologischen Folgen bei Produktionsbeginn der Kaltmassivumformung," *Schmiede-Journal*, pp. 28–32, 2014.
- [7] M. Rosochowska, R. Balendra, and K. Chodnikiewicz, "Measurements of thermal contact conductance," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 135, no. 2–3 SPEC., pp. 204–210, 2003.
- [8] M. Liewald, T. Deliktas, and A. Felde, "Abschlussbericht zur Studie: Stabilisierung von Prozessanlaufphasen in der Kaltmassivumformung," Stuttgart, Deutschland, 2019.
- [9] Y. Qin, R. Balendra, and K. Chodnikiewicz, "Method for the simulation of temperature stabilisation in the tools during multi-cycle cold-forging operations," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 107, no. 1–3, pp. 252–259, 2000.
- [10] T. Terzyk, O. Locher, G. Mc Brain, and B. Tönnemann, "Failure detection and tool optimization based on force sensors and FEM simulation to improve part quality," in *Proceedings of the 49th Plenary Meeting of the International Cold Forging Group*, 2016, pp. 4–7.
- [11] B. Leibe, J. Matas, N. Sebe, and M. Welling, Eds., "Computer Vision - ECCV 2016 - 14th European Conference, Amsterdam, The Netherlands, October 11-14, 2016, Proceedings, Part VI," 2016, vol. 9910.
- [12] D. T. Nguyen, T.-P.-N. Ngo, Z. Lou, M. Klar, L. Beggel, and T. Brox, "Robust Learning Under Label Noise With Iterative Noise-Filtering," 2019.
- [13] M. Liewald, C. Karadogan, B. Lindemann, N. Jazdi, and M. Weyrich, "On the tracking of individual workpieces in hot forging plants," *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 22, pp. 116–120, 2018.
- [14] T. Schmid-Schirling and T. Körber, "Bauteile per Fingerabdruck im Sekundentakt zurückverfolgen," *JOT, J. fuer Oberflächentechnik*, vol. 62, no. 5, pp. 40–42, 2022.
- [15] Y. Qin, "Forming-tool design innovation and intelligent tool-structure/system concepts," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 46, no. 11 SPEC. ISS., pp. 1253–1260, 2006.
- [16] J. Koch and D. T. Kroiß, "Abschlussbericht der Studie : Aktive Matrize," Erlangen, 2010.
- [17] J. Baumgarten, "Aktiver Dehnungsausgleich. Mit neuartigem Werkzeugkonzept doe elastische Matrizenaufweitung bei der Kaltmassivumformung kompensieren," 2002.

Author information

Tahsin Deliktas, M. Sc.

Univ. Prof. Dr.-Ing. Mathias Liewald MBA

Institute for Forming Technology (IFU), University of Stuttgart

Holzgartenstr. 17, 70174 Stuttgart

Tel. +49 711 / 685 82308

tahsin.deliktas@ifu.uni-stuttgart.de

www.ifu.uni-stuttgart.de



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil

26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDR

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming Conference / 9th BrDDR Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis

12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

Hot Forging Die Design Optimization (Green Manufacturing) Using FEM Analysis for Near-Net-Shape Forming of 18CrNiMo7- 6 Steel Pinion Shaft for Wind Turbine

Charles Chemale Yurgel ⁽¹⁾

Nijenthan Rajendran ⁽²⁾

Nicholas Rockwell ⁽³⁾

Wojciech Z. Misiolek ⁽⁴⁾

Ricardo Alves Sousa ⁽⁵⁾

ABSTRACT

The objective of the presented work was to develop a new forging process for a pinion shaft as a component of a wind turbine. A study of near-net-shape forming using DEFORM-3D[®] software was performed to reduce operational cost, time, and material scrap, enhance specific properties, and increase productivity. Near-net-shape forged products have good dimensional accuracy and continuous metal flow lines, which are characteristic of improved mechanical properties. To avoid the traditional trial-and-error experimental method, the technological process and tool design were designed with a careful and detailed numerical simulation approach. In the present work, the Finite Element Method was used to develop a process model for the existing hot forging process of the 18CrNiMo7-6 steel pinion shaft used in a wind turbine. The developed numerical process model was validated via experiment including a comparison of the metal flow lines from the FEM model with the metallography results of the forged part. Two new forging die designs were proposed, and the simulation results were compared to the actual process to achieve improved geometry. The results for the new geometries showed improvements in terms of the die cavity filling for the new proposed dies and better results in grain flow orientation. Compared to the initial non-optimized die, the new

⁽¹⁾ Post-doctoral Researcher. Eng., Lehigh University, USA, chca21@lehigh.edu

⁽²⁾ Ph.D. Eng.; Lehigh University, USA, nir314@alum.lehigh.edu

⁽³⁾ M. Eng.; Lehigh University, USA, nmr215@lehigh.edu

⁽⁴⁾ Prof. Ph.D.; Lehigh University, USA, wzm2@lehigh.edu

⁽⁵⁾ Prof. Ph.D.; University of Aveiro, Portugal, rsouza@ua.pt

designs improved the mechanical properties and offered savings associated with the lower volume of required raw material and fewer finishing operations.

Keywords — Finite Element, Hot Forging, Pinion Shaft, Near Net Shape.

1. INTRODUCTION

In the hot forging processes, the final-part geometry impacts process parameters due to complex interactions between tooling and ingots, which can result in inhomogeneous temperature, stress, and strain distributions within the part. The forging process is usually carried out under extreme thermal conditions to reduce the ingot's yield stress and increase its formability. The results change with the selection of the manufacturing process parameters of complex-part geometry such as gears, shafts, and forged components with teeth. The traditional gears are mass-produced by the machining process with a high production time and high scrap rate, which additionally requires specialized machining tools. To avoid that and at the same time search for improved product mechanical properties, the forging process can be widely regarded as a green manufacturing technology to improve mechanical properties in comparison with machining and casting processes. This is especially true for complex shapes with the presence of a continuous metal flow, resulting in deformed inclusions and improved mechanical properties [1, 2].

A typical forging steel needs to be heat-treated, and the surface-modified layer plays an important role in forged components to enhance the mechanical and/or chemical surface and tribological properties and improves the fatigue life. These types of components typically are exposed to large strains, which induce significant microstructure evolution and the development of the metal flow pattern throughout the part. Various locations of the forged part are submitted to a different deformation path and to grain fragmentation, to the stretching of ductile inclusions, and to the alignment of hard inclusions, resulting in heterogeneous grain flow patterns [3, 4]. A pinion shaft part is a round rod with teeth located parallel to its length, and it is externally connected to a gear mechanism. Pinion shafts, made of 18CrNiMo7-6 steel material, are used for transmitting torque from the motor to the gearbox and are widely used in many industrial components, specifically in high-speed heavy-duty gear applications. The formation of angular carbides during the carburizing process can also be modified by the completed machining operation and result in the formation of cracks. The presence of cracks can significantly reduce the fatigue strength and service life of 18CrNiMo7-6 steel components. The hot forging process is presented as a viable alternative to improve fatigue life [4, 5].

The near-net-shape forged components have good dimensional accuracy, continuous grain flow lines, and superior strength. However, the near-net-shape forging of complex shapes such as gears has certain drawbacks, such as a high forging load needed to fill up the die cavity corners of the gear teeth, the intricate die design required, and a higher tonnage capacity of the press needed in comparison to simple geometries [6, 7].

The FEM is a well-known technique used to numerically evaluate strains and stresses in dies and forged parts, minimizing trial-and-error and saving time and cost production. The optimization steps based on validated numerical results are relevant to evaluate steps and blows, to verify the die service life and forged parts in service. Different materials can be virtually tested as well as process parameters such as loads and speeds [8, 9]. The DEFORM-3D[®] software is a process simulation platform that analyzes the three-dimensional (3D) metal flow in complex metal forming processes. It can model the deformation of complex shapes to replace the expensive and time-consuming trial-and-error in manufacturing processes and is an efficient tool to predict the material flow in industrial forming operations without additional cost and delay on the plant floor. The simulation platform can predict high and low material strains and temperature distribution with high precision [10, 11].

The objective of this work was to utilize the FEM package DEFORM-3D[®] for optimization of the preform geometry and prediction of the metal flow in forged workpieces including the strain distribution and microstructure gradients. The hammering process was applied to 18CrNiMo7-6 steel in a numerical simulation and on the plant floor and the modeling results were verified by the

collected industrial data. The CAD models of the preforms and forging dies were prepared and imported into DEFORM-3D[®] to analyze the effect of preform geometry on forging loads and effective stress for the fully filled die cavity. The macro flow lines were compared to the results of the FEM simulations and allowed analysis of the two proposed preform geometries.

2. EXPERIMENTAL PROCEDURE, NUMERICAL MODEL AND VALIDATION

The experimental part of the presented research started with evaluating the chemical composition of raw material, namely 18CrNiMo7-6 steel. The initial material was received from the partner company after ingot casting and hot rolling with a reduction of 18.2: 1 with a diameter of 152.4 mm and 15 meters of length. The first step in the forging process was to cut the billets into the dimension required by the actual forging process on a bandsaw with each billet measuring 649 mm in length and 152.4 mm in diameter. To obtain the proposed pinion shaft's final geometry, a tooling set consisting of a lower and an upper die using 56NiCrMoV7 steel, appropriate for the hammering process, was designed. The material flow in the hot forging process is presented using the sequence of heating the billets in an FNSA chamber furnace with 1500 kg/hour capacity and natural gas heating at a temperature of 1230 °C for 50 minutes. After that, the heated billet was driven to the pneumatic Beche DG 12.5 drop hammer, and with seven or eight blows the hot forging process was completed. To finish the high-temperature process, the last step was to remove the flash on the eccentric Manke press with a capacity of 4500 kN. To evaluate the fiber orientation in the specimens, the manufacturing process followed the main sequence of the analyzed manufacturing process presented by actual photographs in Figure 1.

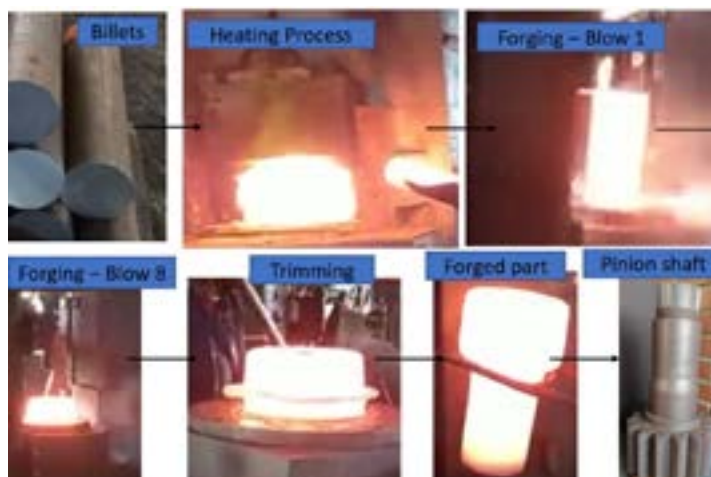


Figure 1: The sequence of the manufacturing process of the pinion shaft.

Numerical simulation process models for 18CrNiMo7-6 steel hot forging were developed using DEFORM-3D[®]. The assembly CAD file provided by the company, as shown in Figure 2, was imported to DEFORM-3D[®]. The workpiece was modeled as plastic and the tooling as a rigid material. The flow stress data for 18CrNiMo7-6 consists of data ranging from 900°C to 1150°C with 50°C increments for three different strain rates of 0.1s⁻¹, 1s⁻¹, and 5s⁻¹ were taken from the literature [12]. The tool material 56NiCrMoV7 steel with a hardness value of 60HRC was used as the die material. The tool's initial temperature was kept at 300°C and the workpiece's initial temperature was kept at 1200°C (close to data provided by the company and used in the actual forging process). For the die movement, a hammer type was chosen, with a total hammer energy of 1.2x10⁵ J. The mass of the primary top die was kept at 16 tons and the counter hammer mass was kept at 17 tons with a stiffness value of 1x10⁸ N/mm. Since a multi-blow forging process was considered, a blow table was created as shown in Table 1. The percentage of total hammer energy used constantly increased from the initial first blow to the final blow, as more energy is required to force a flash formation and to completely fill the die cavity. Efficiency was assumed to be 100%, making all the blow energy used to

deform the workpiece with no energy loss. After each blow, the top die went up and dwelled in that position for 1 second before coming down for the second blow.

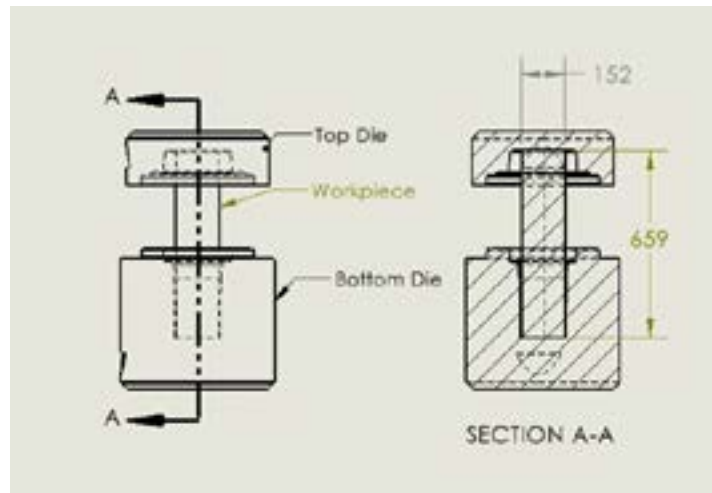


Figure 2: Schematic representation of 18CrNiMo pinion shaft forging process.

Table 1 – Blow table of the actual process.

Blow [#]	Blow strain [%]	Energy [J]	Efficiency [%]	Dwell [S]
1	65	7.8×10^4	1	1
2	75	9×10^4	1	1
3	85	1.02×10^5	1	1
4	95	1.14×10^5	1	1
5	95	1.14×10^5	1	1
6	95	1.14×10^5	1	1
7	95	1.14×10^5	1	1
8	95	1.14×10^5	1	1

The Archard wear model as shown in Equation 1 was used to predict the tool wear depth.

$$z_{ab} = \int K \frac{p^a v^b}{H^c} dt \quad [1]$$

where z_{ab} is the abrasive wear depth, p is the interface pressure, v is the local sliding velocity and dt represents the incremental time step; H is the tool hardness, and K , a , b , and c are experimental constants. The shear friction factor of 0.3 and interface heat transfer coefficient of 11 N/sec mm °C were used between the workpiece and tooling. The local pressure and velocity are calculated as the numerical simulation runs, and exponent values of a , b , and c are usually taken as 1, 1, and 2 for steel tools. The coefficient K represents the magnitude of predicted tool wear and usually has a value in the order of 1×10^{-6} to 1×10^{-7} .

The numerical simulation process model for 18CrNiMo7-6 steel took eight blows to fill the die cavity, the same as in the actual forging process with a maximum load of 4603 tons, as shown in

Figure 3. To validate the developed process model, results predicted from the simulation were compared to the actual forging process parameters provided by the company from their industrial trials. First, the metal flow pattern observed in the deformed part using the metallography technique was compared with the flow pattern predicted by the process model as shown in Figure 4. As one can see, the flow pattern (highlighted by the red lines) in Figure 4a, predicted from the process model, does match the actual metal flow pattern in the forging process shown in the middle of the magnified portion of Figure 4b as well. Secondly, the tool conditions were checked and compared to the original tool in the forging process. Die stress analysis and tool wear depth study were performed to analyze the tool behavior in the process model.

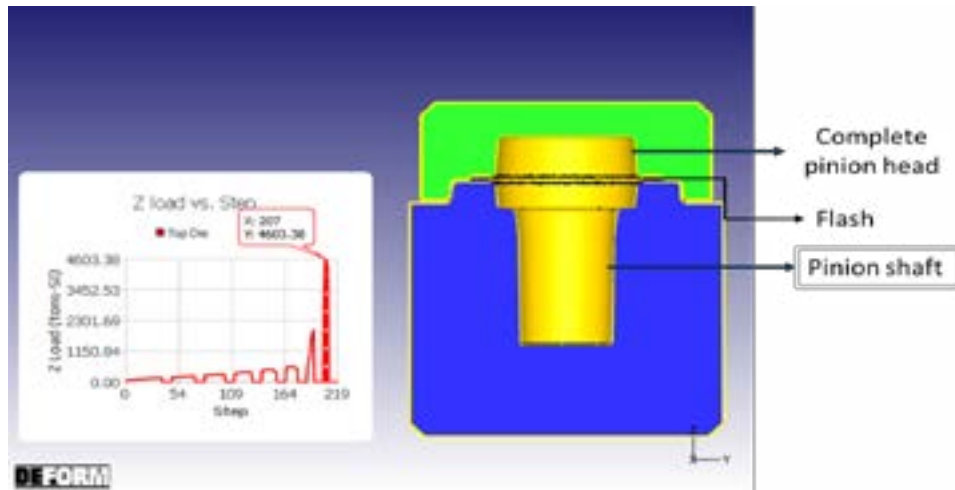


Figure 3: Top die load exerted by the workpiece during flash formation.

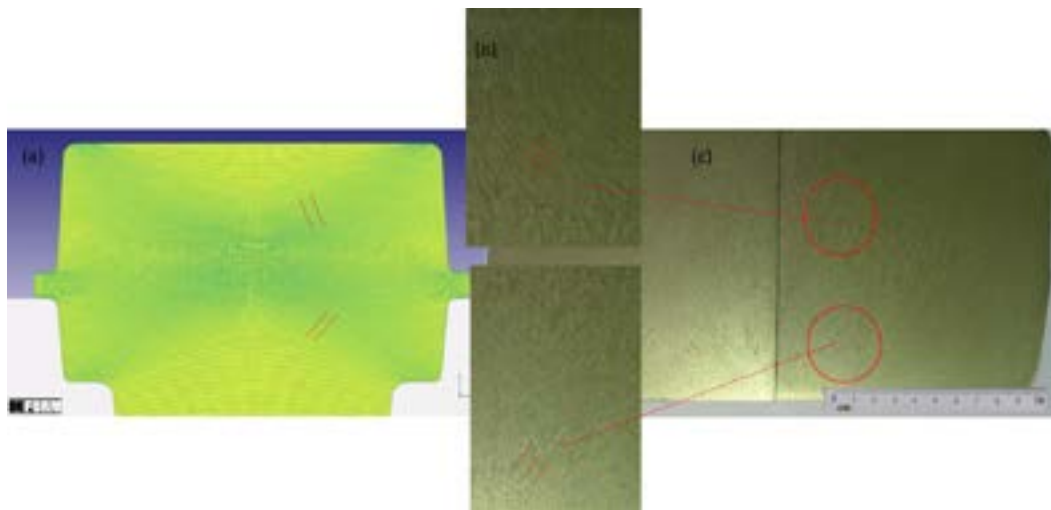


Figure 4: a) Deformed grid pattern in the forging FEM simulation, b) Metal flow pattern of the circled portion zoomed in, c) Metallography of pinion shaft head after forging showing metal flow lines.

For the die stress analysis, a step in which the tool experiences the maximum load is taken for the final blow where the flash is formed as shown in Figure 3. The stress study for a new die was generated in DEFORM-3D[®] where the model considers the tools' material with elastic properties at that step. The forces applied by the workpiece at that step on the tools were interpolated in the model as shown in Figure 5. To study which region of the tool experiences maximum stress and to check what kind of stress that region is under, both effective stress and maximum principal stress

distribution were investigated.

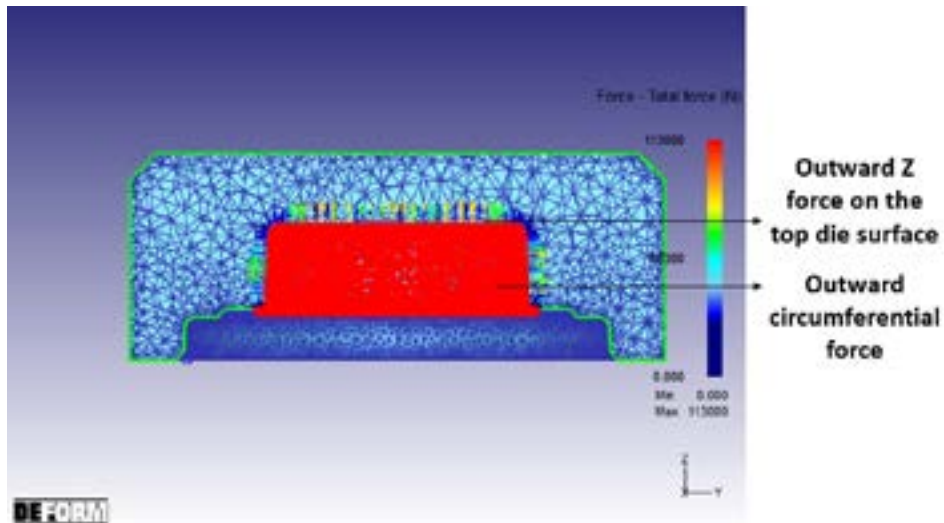


Figure 5: Force interpolation on the top die at flash formation.

The validated numerical process model was used to further analyze two new near-net-shape top die designs. A top die with a pinion gear profile incorporated and a second top die with an additional punch was analyzed using the developed process model as shown in Figures 6 and 7, respectively. The workpiece volume was modified with different workpiece lengths compared to the length of the workpiece in the actual process for both processes, as the machining step can be avoided since it can get the final near-net-product.

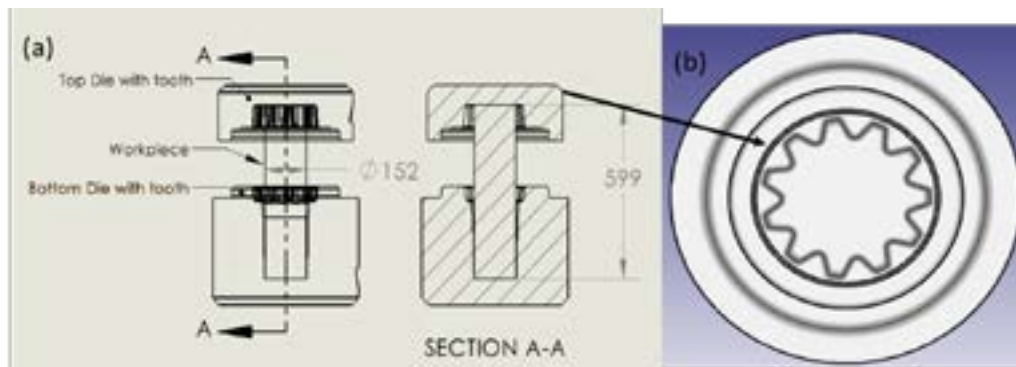


Figure 6: a) Schematics of near-net-shape forging, b) Top die with gear teeth incorporated.

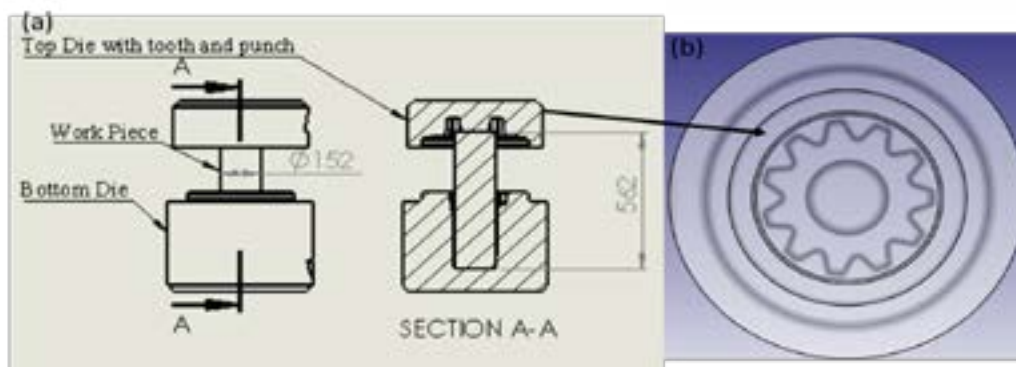


Figure 7: a) Schematics of near-net-shape forging, b) Top die with gear teeth and punch.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The main advantage of near-net-shape forging is the reduction of the machining steps involved in the entire manufacturing process. Figure 8 shows a comparison of the deformed grid pattern of the pinion head from the top view. In the current process, the forged pinion head must be machined to incorporate the gear teeth in the head which will result in reducing the flow line shown in Figure 8a, decreasing the mechanical properties of the final part. Whereas the near-net-shape forged pinion head with incorporated gear teeth will have more desirable mechanical properties, improving directional resistance and fatigue life of the component due to deformed grid lines from the forging as

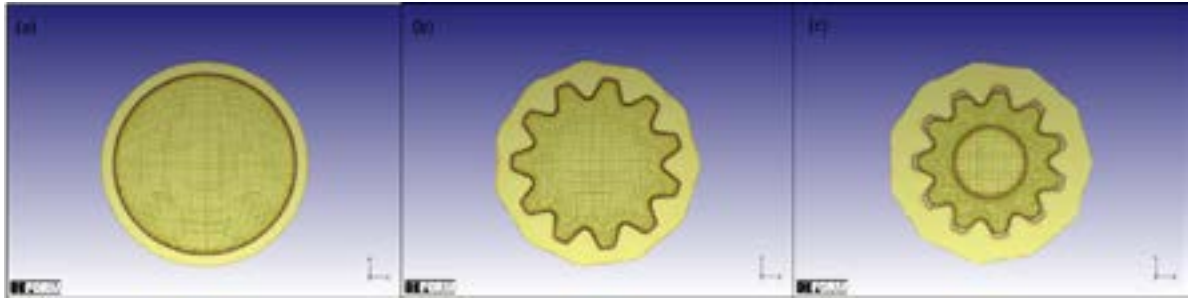


Figure 8: Deformed grid pattern flow line in the forged pinion head from top view: a) Actual forged head, b) Forged head with teeth, c) Forged head with teeth and punched hole.

shown in Figures 8b and 8c.

Figures 9 and 10 (lateral view) show the comparison of effective stress distribution in the top die. The red region in Figures 9 and 10 shows the spot where the stress is higher, as it can demonstrate the thickness of the red region that increases gradually from the actual die to the die with a punch. The number of cycles the top die can perform without cracking decreases as it moves from the left to the right.

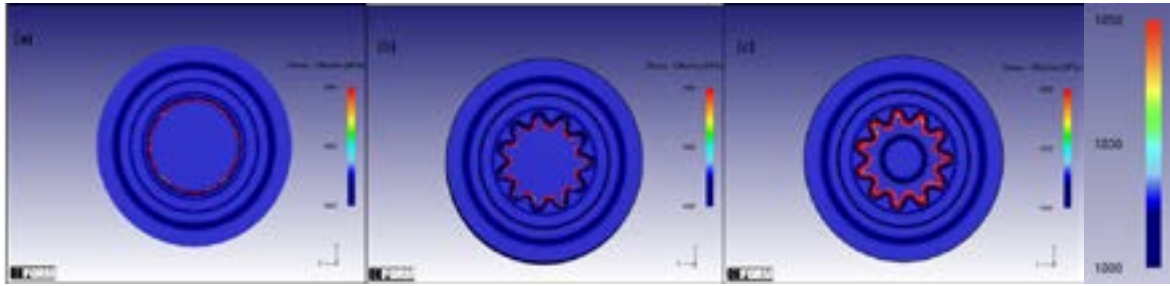


Figure 9: Comparison of effective stress in MPa: a) Actual top die, b) Top die with teeth, c) Top die with punch.



Figure 10: Comparison of effective stress in MPa (with a lateral view): a) Actual top die, b) Top die with teeth, c) Top die with punch.

Once again, the Archard wear model was used to analyze the wear depth pattern in the new near-net-shape top dies. Figure 11 shows the comparison of wear depth patterns between the actual top die and the two near-net-shape proposed dies. It is possible to see the wear pattern in the flash opening section in all the dies, but it is more significant in the die with a punch as shown in Figure 11c. Wear depth for the near-net-shape dies are in general higher than the actual tool as there is more sliding motion between the teeth profile in the die, punch, and workpiece material. Since the maximum load, die stress, and wear depth are higher in the two near-net-shape top dies compared to the actual die design, it is expected that the life span of the dies will be less than 300 cycles, which is the life cycle of the current top die before cracking appears. The possible solution for die life in this case should be an improvement with appropriate and superficial heat treatment of the upper die, to benefit from more cycles and keep the advantage enabling better properties in the forged part of the pinion shaft, as well as increase the quantity of raw material—the primary goals expected by the company from these results.

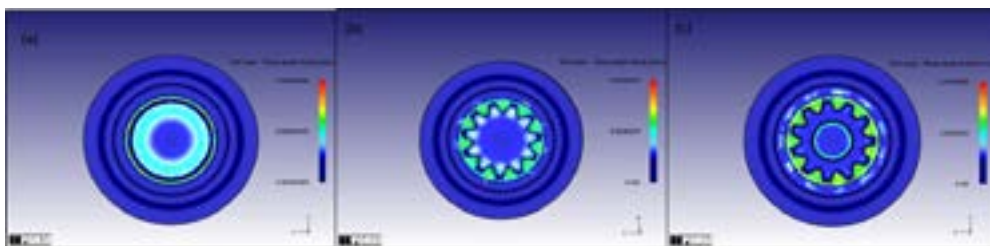


Figure 11: Comparison of wear depth pattern in mm: a) Actual top die, b) Top die with the teeth, c) Top die with a punch hole.

4. CONCLUSIONS

A numerical simulation process model for hot forging of 18CrNiMo7-6 steel was developed using commercially available DEFORM-3D[®] software. The developed process model was validated by comparing the numerical prediction with the experimental measurements. The following comparisons

were initially made: 1) the metal flow numerical predictions and the metal flow lines from the experiment, 2) the die stress prediction with the crack formation, as this geometry requires special attention, and 3) the tool wear pattern was predicted using the Archard wear model. Based on these comparisons it was found that the developed numerical process model was able to represent closely the actual forging process, and the developed process model can be further used to analyze and improve process efficiency.

The validated process model examined two near-net top die designs in DEFORM-3D[®] using the established process model. Based on the post-processing evaluation of these two dies' designs the following conclusions were made:

1. The newly proposed tooling designs incorporating teeth gear resulted in 10 to 15% less feedstock material needed to form the near-net-shape forged final part.
2. The FEM forging process simulation is confirmed and approved with the profile of hardness measurements and grain flow orientation (metallography) of the actual geometry indicating improved mechanical properties.
3. The top die design with teeth incorporated the same number of blows to fill the die cavity while experiencing higher die loads at the final blow. The die with both teeth and punch design took one extra blow to fill the die cavity while experiencing an even higher die load than the die with just the teeth design. It could be an expected drawback in changes of geometry, but with considerable advantages in the new geometry: resulting in less machining, savings on raw material, improvement in fatigue life, and directional resistance in the teeth area, which are of great importance to the company.
4. Higher forging stresses and therefore increased tool wear is predicted by numerical modeling for two sets of near-net-shape dies. Therefore, it is recommended to consider the die surface enhancement technique to extend tool life.

REFERENCES

- [1] Hsu, C.C; Chiu, H. Y; Liao, C.C; Fuh, Y.K; An investigation on deformation mechanism of non-standard gear teeth forming in the hot impression forging of multicore cable cutter. *Journal of Manufacturing Processes*. 2020; 54:158-168.
- [2] Quin, S.; Zhang, C.; Zhang, B.; et al. Effect of carburizing process on high cycle fatigue behavior of 18CrNiMo7-6 steel. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022; 36:1136-1149.
- [3] Bambach, M; Imran, M; Sizova, I; et al. A soft sensor for property control in multi-stage hot forming based on a level set formulation of grain size evolution and machine learning. *Journal of Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*. 2021; 2:100041.
- [4] Chastel, Y; Caillet, N; Bouchard, P. O. Quantitative analysis of the impact of forging operations on fatigue properties of steel components. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006; 177:202-205.
- [5] Fu, P; Zhan, K; Jiang, C. Micro-structure and surface layer properties of 18CrNiMo7-6 steel after multistep shot peening. *Materials and Design*. 2013; 51:309-314.
- [6] Mulutinovic, M; Balos, S; Plancak, M; Movrin, D. Comparison of some mechanical properties and micro-topography of a component with non-axisymmetric geometry manufactured by cold orbital and hot forging. *Journal of Materials Processing Tech*. 2017; 249:179-192.
- [7] Kanani, J. B; Lalwani, D. I. An experimental and FEA investigation of near-net-shape cold forging of spur gear. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 44:92-98.
- [8] Soranansri, P; Yanil, S; Sirivedin, K. Finite element modeling of shrink-fit design for improvement of die-service life in hot forging process of a bevel gear. *Materials today: Proceedings*. 2019; 17:1711-1719.
- [9] Renault, C; Churyumov, A. Y; Pozdniakov, A. V; Churyumova, T. A. Microstructure and hot deformation behavior of FeMnAlCMo steel. *Journal of Material Research and Technology Processes*. 2020; 9:4440-4449.
- [10] Equbal, M. I; Kumar, R; Shamim M, Ohdar RK. A grey-based Taguchi method to optimize hot forging process. *Procedia Materials Science*. 2014; 6:1495-1504.
- [11] How, C. K. J; Behdinan, K. Neutral networks with input dimensionality reduction for efficient temperature distribution prediction in a warm stamping process. *Journal of Applied and Computational Mechanics*. 2022; 8:1431-1444.
- [12] Yikui, X; Qicheng, W; Zikun, et al. Recrystallization Mechanism and processing map of 18CrNiMo7-6 alloy steel during hot deformation. *Metals*. 2022; 12:838.

A importância da Curva Limite de Conformação na seleção de materiais para peças estampadas.

Dr.Eng. Fabrício Dreher Silveira

Resumo: O estudo considerou o impacto dos diferentes ciclos de tratamento térmico utilizados na produção de folhas metálicas na fabricação de componentes para embalagens metálicas. Os ciclos térmicos de Recozimento Contínuo e Recozimento em Caixa influenciam na qualidade final de componentes estampados e podem provocar a ruptura da peça se não forem corretamente aplicados. Na produção de Anéis para a montagem de Latas 900 ml foram aplicadas folhas obtidas através de ambos os ciclos de Recozimento. A simulação por elementos finitos foi utilizada para a análise da primeira operação de estampagem do Anel. As Curvas Limite de Conformação (CLC) para as folhas de espessura 0,25 mm e 0,22 mm foram traçadas para as têmperas T57 e TH415 e inseridas na base do software de simulação PAM-STAMP. A simulação por elementos finitos replicou o comportamento obtido na prática, onde se pôde verificar o impacto de diferentes processos de Recozimento em folhas metálicas, quando aplicado na conformação de geometrias mais severas. A Curva Limite de Conformação foi importante na identificação da condição de material adequada para a estampagem da geometria referida.

Palavras-Chave: Folha Metálica; Recozimento; Embalagem Metálica; Curva Limite de Conformação.

1. INTRODUÇÃO

Cada tipo de chapa metálica ferrosa ou não-ferrosa pode ser deformada até um certo nível para que ocorra a estricção localizada e a fratura. Este nível depende principalmente da combinação de deformações impostas, ou seja, da relação entre as deformações principais, maior e menor. O nível mais baixo de deformações ocorre no estado plano de deformações ou próximo dele, isto é, quando a deformação principal menor é zero.

A correlação frequentemente encontrada no teste comum de estampabilidade e o desempenho real do metal na produção de peças levou os pesquisadores a investigar parâmetros mais fundamentais. A estricção localizada requer uma combinação crítica de deformações principais máxima e mínima (ao longo de duas direções perpendiculares sobre o plano da chapa). Este conceito levou ao desenvolvimento de diagramas conhecidos como **Curvas Limite de Conformação (CLC)**. A CLC é uma ferramenta importante para as técnicas de teste de estampabilidade, pois representa a deformação principal maior no início da estricção plotado para todos os valores da deformação principal mínima que podem ser suportados [1]. Uma curva usual para o aço pode ser vista na figura 1.

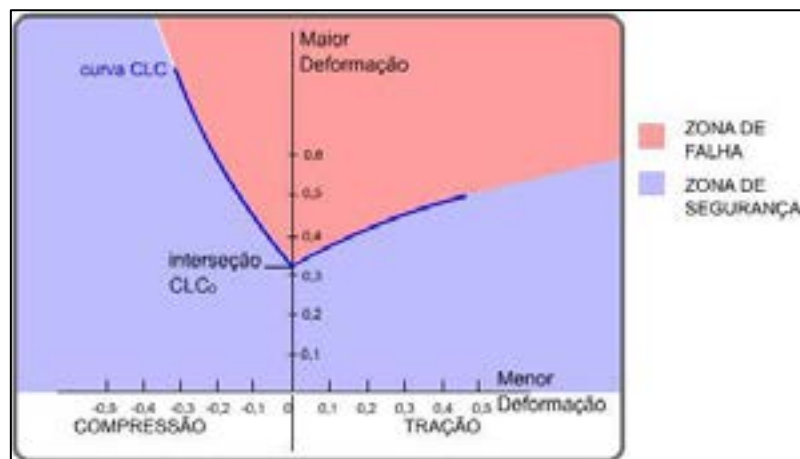


Figura 1 – CLC típica para o aço. [1].

Admitindo-se que a curva representa os valores possíveis das combinações de deformação do corpo de prova que apontam sinais de início de ruptura, a curva pode ser interpretada como uma fronteira entre regiões de falha e segurança. A região acima da curva é a região de falha ou ruptura. A região abaixo da curva representa a região de segurança.

O ramo de embalagens metálicas envolve um complexo fluxo de produção que tem início na fabricação da matéria-prima que é submetida a processos de conformação mecânica. A Lata de 900ml geralmente é utilizada no envase de thinner, solvente e tinta. Estas Latas possuem Tampa com Anel para encaixe, os quais, além de oferecer maior eficiência no processo de envase dos produtos, permitem maior agilidade no manuseio para abertura e fechamento pelo cliente final.

2. FLUXO DE PRODUÇÃO DE FOLHAS METÁLICAS

A produção de embalagens metálicas tem seu fluxo baseado na transformação de finas chapas de aço com espessura máxima de 0,45 mm. Estas são chamadas folhas metálicas, as quais na sua fabricação passam por processos de conformação mecânica, tratamento térmico e revestimento superficial.

A fabricação de folhas metálicas passa pelos processos de Lingotamento Contínuo, onde são produzidos lingotes de 250 mm de espessura, e Laminação a Quente. A figura 2 mostra a sequência de processos nesta etapa.

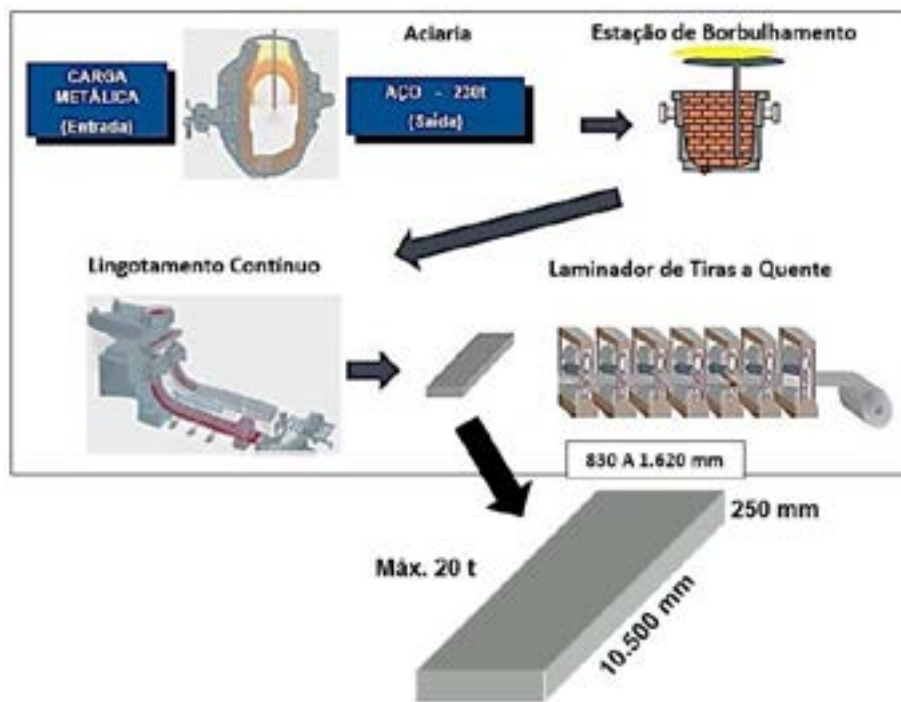


Figura 2 – Fluxo de produção de folhas metálicas – Laminação a Quente [2].

As bobinas geradas seguem para Decapagem e Laminação a Frio. Após, as bobinas são submetidas ao Recozimento por dois ciclos distintos, sendo um deles em forno estacionário (Caixa) e outro em forno contínuo. O produto folha metálica contempla em sua composição aços da classe baixo carbono que por sua vez geram uma fração volumétrica de cementita muito baixa, além desses fatores, são aços que trabalham com altas taxas de deformações a frio (91%).

A figura 3 ilustra o fluxo de produção a partir da Laminação a Frio.

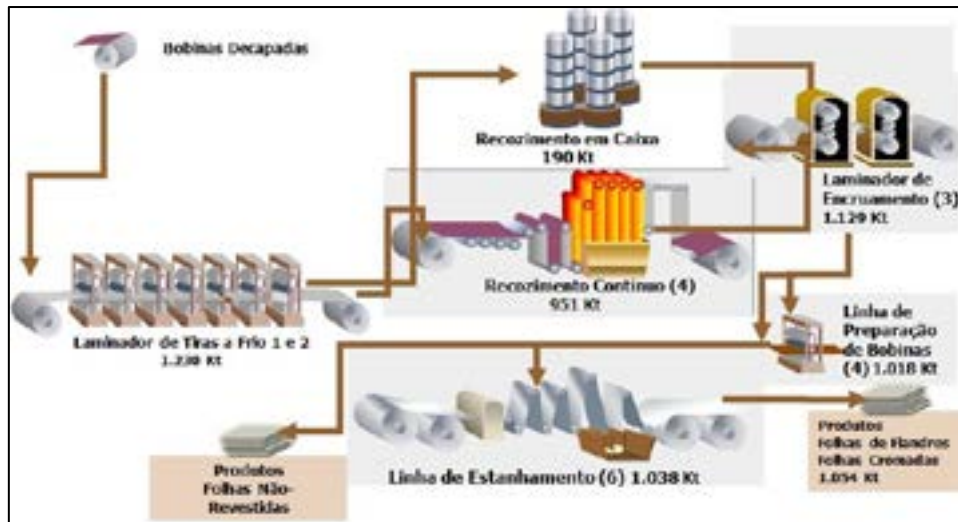


Figura 3 – Fluxo de produção de folhas metálicas [2].

O Recozimento em Caixa é um processo estático, onde se faz o recozimento empilhando as bobinas em uma base, com posterior abafamento de uma campânula de aço e logo a seguir o forno. O produto é uma bobina recozida variando as têmperas de T1 - T2 - T3, usadas para embalagens onde requer uma conformação mais severa. A figura 4 mostra a linha de Recozimento em Caixa e o perfil Temperatura x Tempo do ciclo térmico.

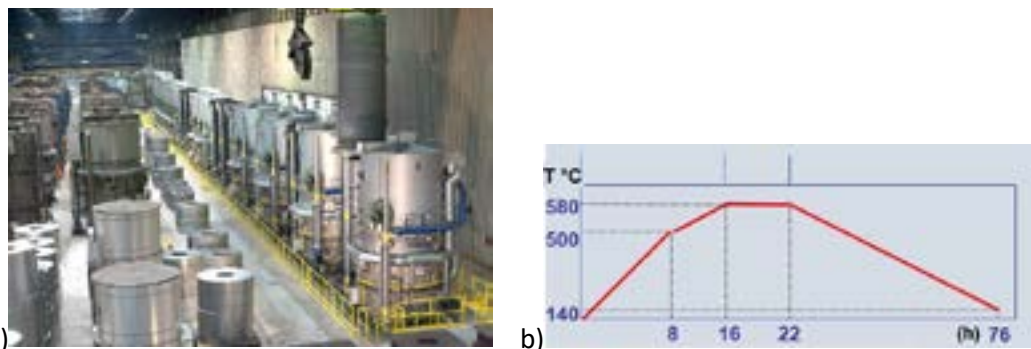


Figura 4 – a) Linha de Recozimento em Caixa na CSN. b) Patamares de Temperatura x Tempo do ciclo térmico [3].

O Recozimento Contínuo é um processo em que se faz o recozimento através de uma linha contínua composta de limpeza eletrolítica e forno com quatro seções, em passes verticais (aquecimento, encharque, resfriamento lento e resfriamento rápido). O produto é uma bobina recozida, variando as têmperas de T3,5 - T4, T5, DR; usadas para embalagens onde requer uma conformação menos severa. A figura 5 mostra a linha de Recozimento Contínuo e o perfil Temperatura x Tempo do ciclo térmico.

Cada processo de Recozimento resulta em microestruturas distintas as quais são suscetíveis a diferentes taxas de deformação a frio. Geralmente, materiais recozidos via Caixa formam microestrutura com grãos alongados (panquecas) conforme mostrado na figura 6.

Já os materiais de Recozimento Contínuo apresentam grãos poligonais heterogêneos com cementita dispersa ou alinhada na matriz. A figura 7 mostra a microestrutura obtida no Recozimento Contínuo.

O Laminador de Encruamento é um processo em que se faz uma segunda laminação a frio após o recozimento, com reduções de 18 a 36%. O produto é uma bobina não revestida duplamente reduzida, com a espessura mínima de 0,14 mm. A figura 8 mostra a linha de aplicação da segunda redução.



a)



b)

Figura 5 – a) Linha de Recozimento Contínuo na CSN. b) Patamares de Temperatura x Tempo do ciclo térmico [3].

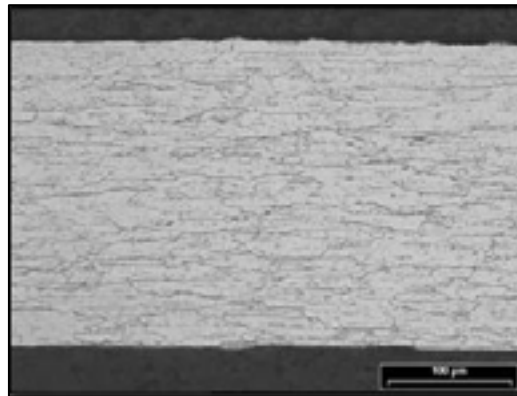


Figura 6 – Microestrutura resultante de Recozimento em Caixa. Tamanho de grão entre 8 – 10 ASTM [3].

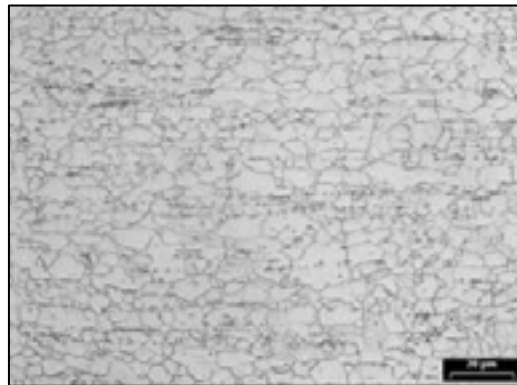


Figura 7 – Microestrutura resultante de Recozimento Contínuo. Tamanho de grão entre 11 – 12,5 ASTM [3].



Figura 8 – Laminador de Encruamento [2].

O produto destas operações são bobinas metálicas recozidas, com revestimento de estanho (Folhas de Flandres) [4] ou cromo. As bobinas são cortadas em folhas, o qual é o formato aplicado na produção de embalagens metálicas. A figura 9 relaciona os produtos na fabricação de folhas metálicas.

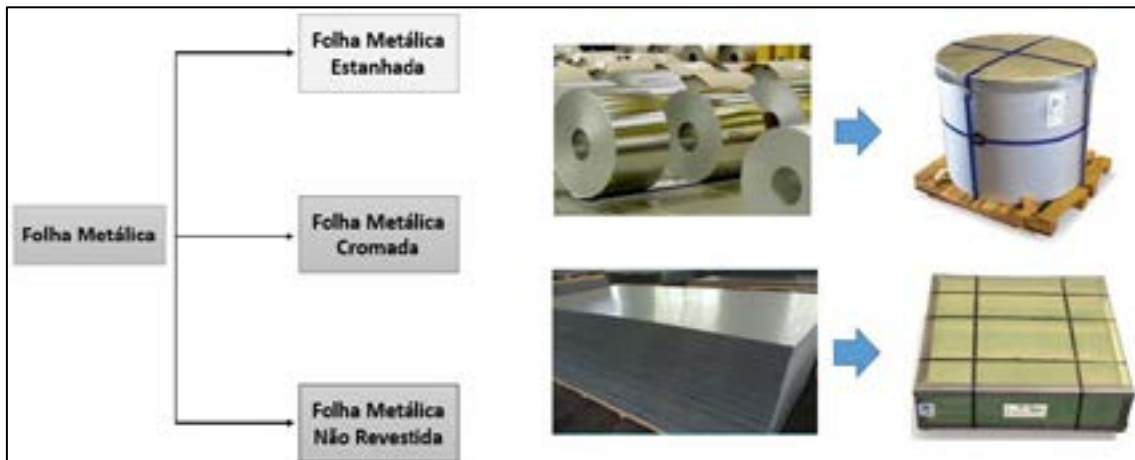


Figura 9 – Produtos do fluxo de produção de Folhas Metálicas [3].

As folhas metálicas são fornecidas ao mercado com a seguinte descrição.

- **FFL 0,22 X 850 X 834 T57 2,8/2,8**
- **FCR 0,19 X 902 X 776 TH415 60/60**

Sendo,

FFL ou FCR – folha estanhada ou cromada.

Dimensões da folha: espessura x largura de bobina x avanço de corte, em mm.

T57 ou TH415 – classificação de recozimento de material (ver tabela 1).

2,8/2,8 ou 60/60 – revestimento; massa por área de Sn ou Cr depositada por face, em (g/m²).

A tabela 1 mostra a classificação do recozimento de material em relação ao seu limite de escoamento segundo as normas NBR HR30T, ASTM/JIS e EURO NORMA (Mpa). A figura 10 mostra exemplos de aplicação de folhas metálicas de acordo com seu limite de escoamento (LE), junto a uma curva sobre a relação custo X espessura de folha.

Tabela 1 – Classificação para recozimento de folhas metálicas [3].

NBR HR30T	ASTM/JIS	EURO NORMA (MPa)
T50	T1	TS230
T52	T2	TS245
T55	T2,5	TS260
T57	T3	TS275
T59	T3,5	TH390
T61	T4	TH415
T65	T5	TH435
DR520	DRS	TH520
DR550	DR8	TH550
DR620	DR9	TH620
DR660	DR9M	---

	TS= Recozimento em Caixa
	TH= Recozimento Contínuo
	DR= Laminador Dupla Redução

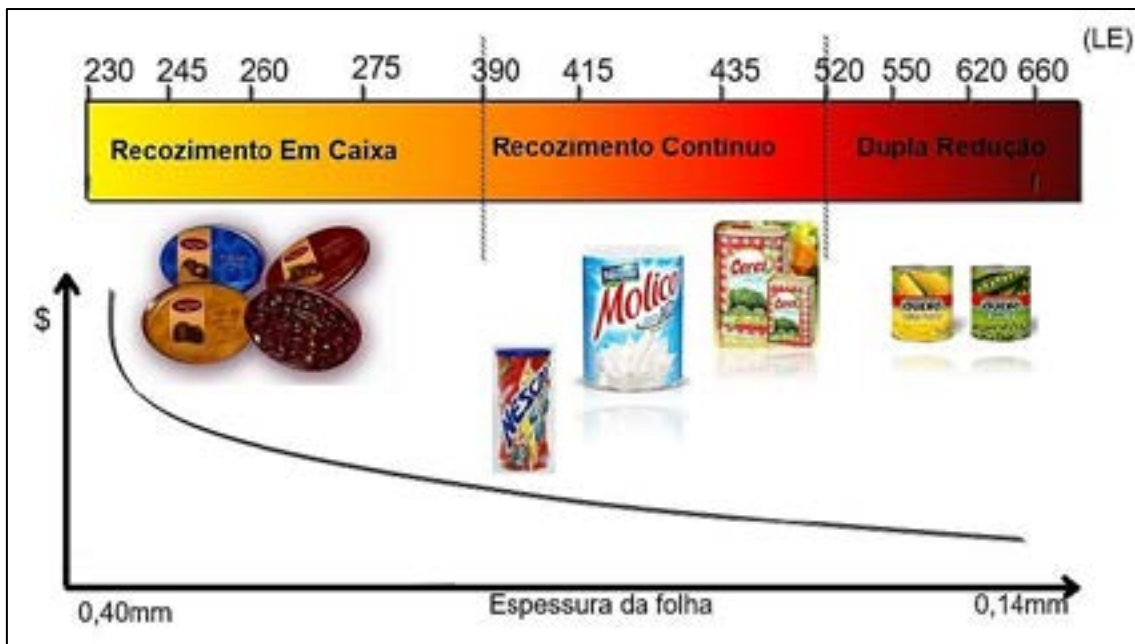


Figura 10 – Relação custo X espessura de folha. Aplicações conforme limite de escoamento (LE) [3].

3. ANÁLISE EXPERIMENTAL

A estrutura de montagem da Lata 900 ml considera Anel e Fundo unidos por recravação ao seu Corpo. A Tampa é encaixada no Anel para após o envaze do produto e posterior utilização pelo usuário. A figura 11 mostra a estrutura desta embalagem.

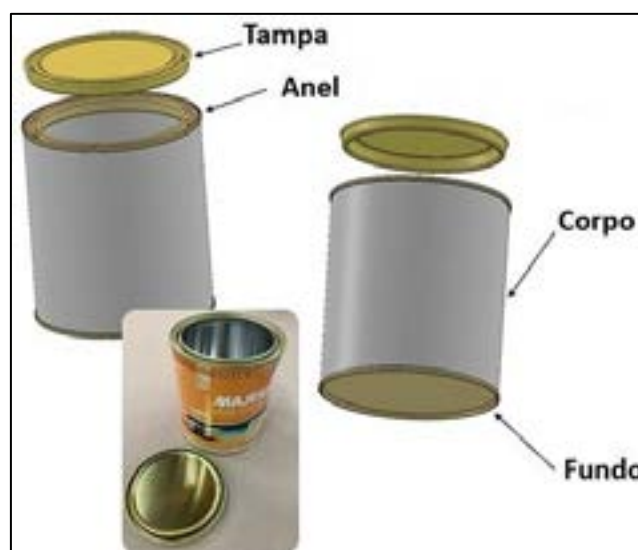


Figura 11 – Componentes da Lata 900 ml.

O Anel da Lata 900 ml é produzido pelo processo de Estampagem a partir de folhas metálicas estanhadas e envernizadas. O processo ocorre em duas operações de conformação a frio, onde há o corte do disco e furação do diâmetro interno na primeira operação. Na segunda operação, ocorre o repuxo para a formação do formato final. A figura 12 mostra o perfil obtido nas duas operações de conformação mecânica.



Figura 12 – Produto de estampagem do Anel 04 em duas operações.

O estudo foi baseado na busca por redução de espessura de folha, e conseqüente redução de custo industrial do Anel, onde a substituição da espessura 0,25 mm por 0,22 mm foi o objetivo. A primeira operação de Estampagem foi considerada para análise por elementos finitos e definição da matéria-prima adequada. A figura 13 mostra a vista em corte da ferramenta desta operação. O perfil do produto desta ferramenta é mostrado na figura 14.

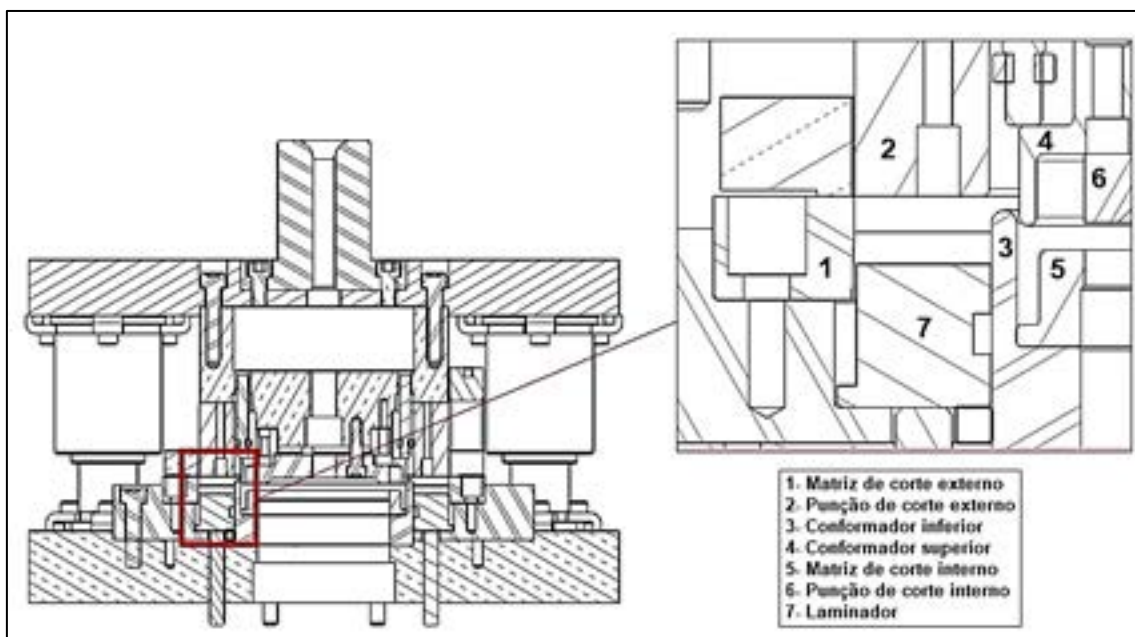


Figura 13 – Vista em corte da ferramenta de estampagem do Anel 04. Primeira operação.

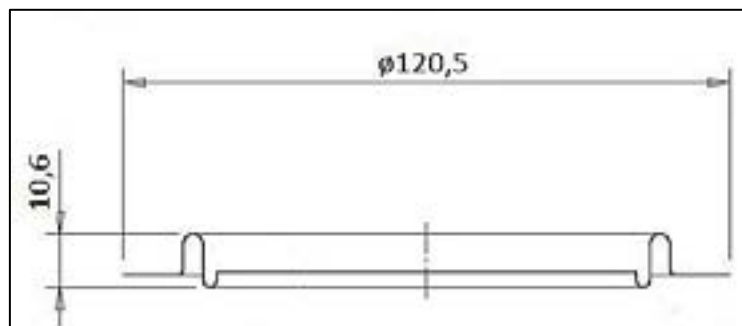


Figura 14 – Perfil do produto da primeira operação de Estampagem do Anel 04.

Duas folhas metálicas de espessura 0,22 mm foram propostas para a análise para a substituição de material. A simulação por elementos finitos foi realizada com o software **PAM-STAMP** sobre os materiais vistos na tabela 2.

Tabela 2 – Materiais analisados na Estampagem a frio do Anel 04 (primeira operação).

Materiais	FFL 0,25 T57 2,8/2,8
	FFL 0,22 T57 2,8/2,8
	FFL 0,22 TH415 2,0/2,0

As Curvas Limite de Conformação foram traçadas e utilizadas na simulação numérica. Os ensaios com os corpos de prova foram realizados em uma máquina INSTRON 5585H, utilizando uma célula de carga de 3.000 kgf e um Extensômetro 50.0 AVE. A velocidade de ensaio aplicada foi de 1 mm/min. até o alongamento de 3%. Após este alongamento a velocidade foi aumentada para 10 mm/min. As curvas de escoamento foram geradas na base do software PAM-STAMP, pelo modelo de Krupkowski. A figura 15 mostra a CLC e curva de escoamento para a folha FFL 0,25 T57 2,8/2,8.

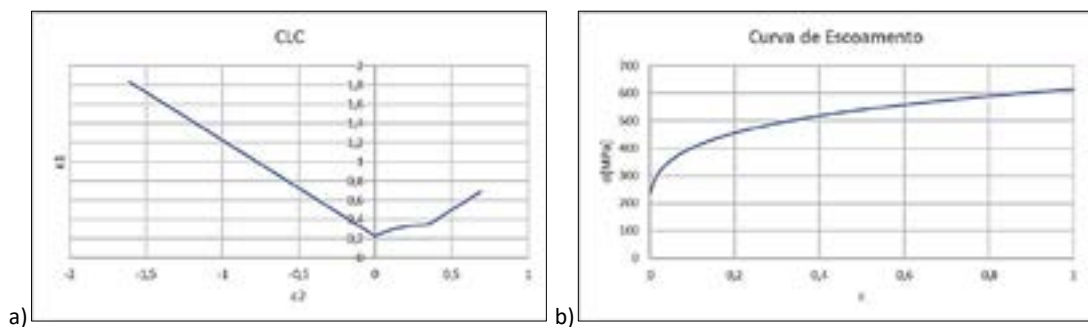


Figura 15 – a) CLC e b) Curva de Escoamento para FFL 0,25 T57 2,8/2,8.

A simulação numérica foi realizada considerando as curvas da figura 15. A figura 16 mostra a evolução das etapas de simulação.

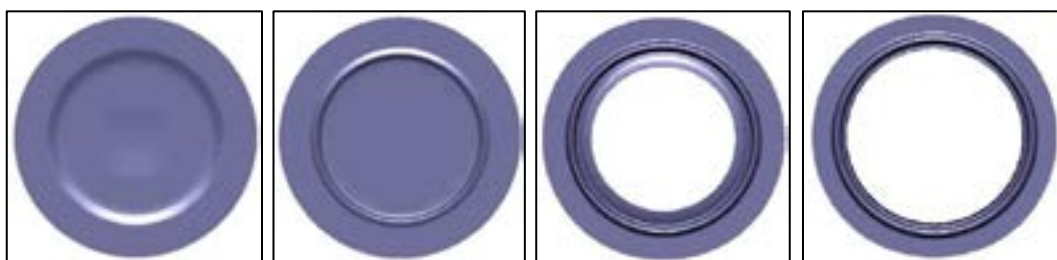


Figura 16 – Evolução da simulação numérica para FFL 0,25 T57 2,8/2,8.

A figura 17a mostra o resultado de simulação com as regiões de deformação após a conformação do Anel 04. Observam-se regiões predominantes de compressão e estiramento. Estes resultados são representados na sua CLC e se pode ver na figura 17b que o estado de deformações se situa na região de segurança do material, ou seja, abaixo da zona crítica da CLC.

A figura 18 mostra a CLC e curva de escoamento para a folha FFL 0,22 T57 2,8/2,8. A simulação por elementos finitos foi conduzida com as mesmas variáveis e as curvas da figura 18.

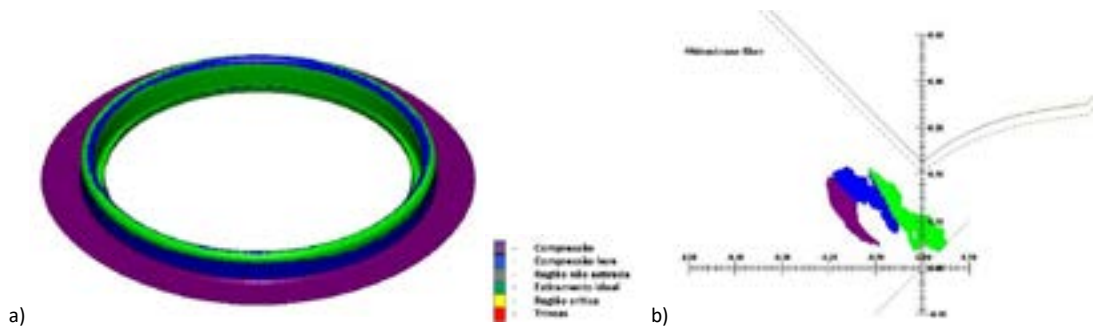


Figura 17 - a) Resultado de deformação verdadeira do Anel 04. b) Análise de deformação do Anel 04 sobre a CLC para FFL 0,25 T57 2,8/2,8.

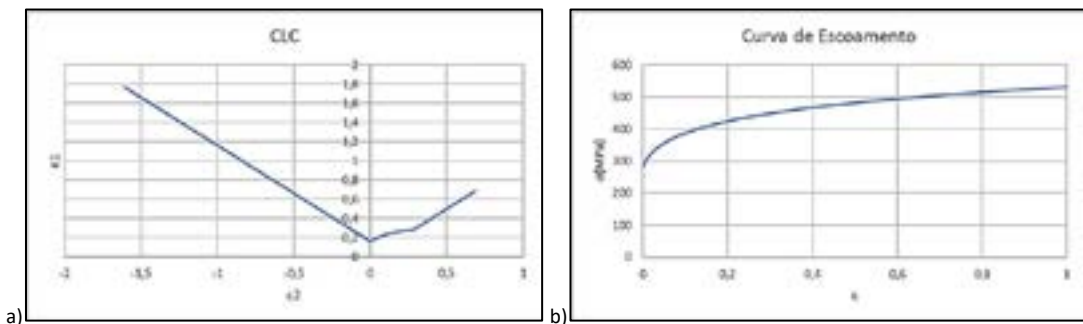


Figura 18 – a) CLC e b) Curva de Escoamento para FFL 0,22 T57 2,8/2,8.

A figura 19 mostra o resultado de simulação com as regiões de deformação representadas na CLC para o material FFL 0,22 T57 2,8/2,8. Há a predominância de regiões de compressão e estiramento, tal como, a folha de espessura 0,25 mm. O estado de deformações está localizado na região de segurança, porém, mais próximo à zona crítica de deformação.

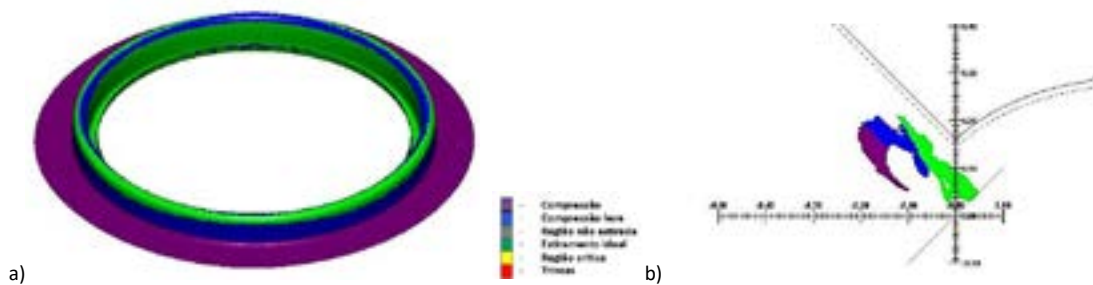


Figura 19 - a) Resultado de deformação verdadeira do Anel 04. b) Análise de deformação do Anel 04 sobre a CLC para FFL 0,22 T57 2,8/2,8.

A figura 20 mostra a CLC e curva de escoamento para a FFL 0,22 TH415 2,0/2,0. Neste caso, se percebe a deformação principal maior mais próxima de zero devido à microestrutura de recozimento contínuo. A figura 21 mostra a evolução das etapas de simulação.

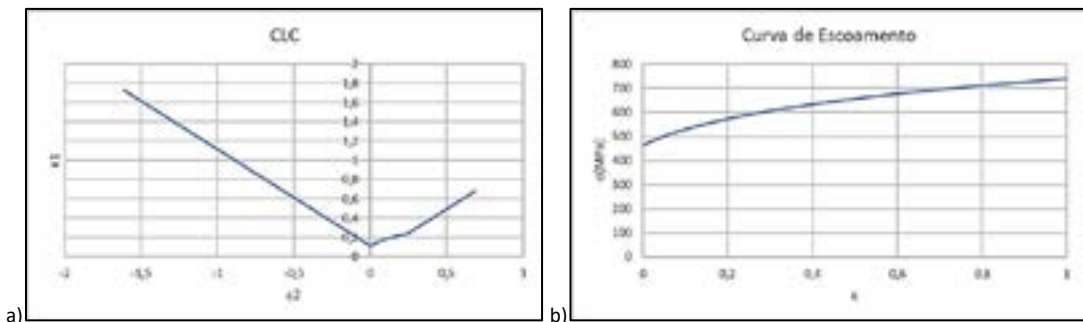


Figura 20 – a) CLC e b) Curva de escoamento para FFL 0,22 TH415 2,0/2,0.



Figura 21 – Evolução da simulação numérica para FFL 0,22 TH415 2,0/2,0.

O resultado mostrado na figura 21 expõe a dificuldade em na formação desta geometria de peça com o material TH415. O enrugamento de superfície é significativo até a formação da geometria final. A figura 22 mostra a deformação resultante na peça ao final da simulação.

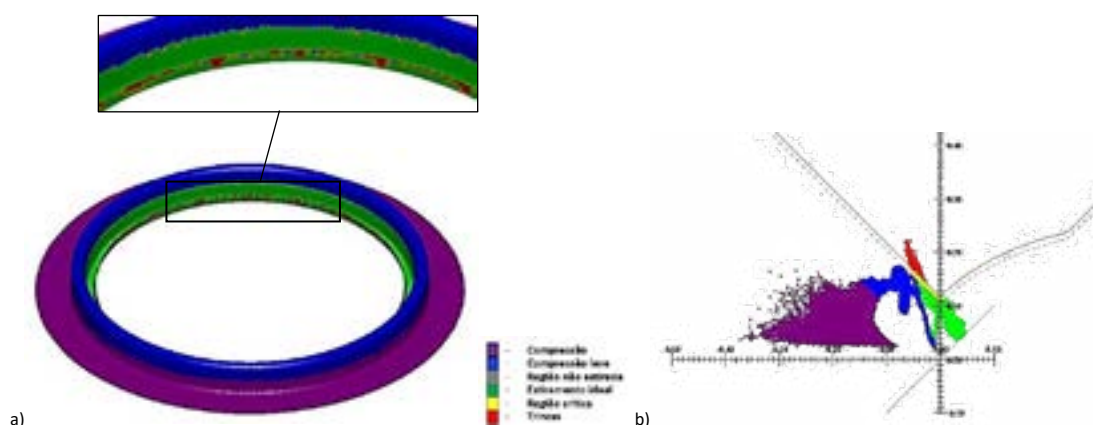


Figura 22 - a) Resultado de deformação verdadeira do Anel 04. b) Análise de deformação do Anel 04 sobre a CLC para FFL 0,22 TH415 2,0/2,0.

A simulação por elementos finitos com a folha metálica TH415 apresentou regiões com tendência de surgimento de trincas, o que indica que materiais com este limite de escoamento não são adequados para a conformação a frio desta geometria de peça. Os ensaios práticos evidenciaram este comportamento, e isto é mostrado na figura 23.



Figura 23 – Falha ocorrida no Anel 04 (1ª operação). Material FFL 0,22 TH415 2,0/2,0.

4. CONCLUSÃO

Para a maioria dos aços carbono, a CLC tem a mesma forma da figura 1. Contudo, ao longo das análises realizadas sobre três materiais, se pode verificar que a posição da curva sobre o eixo vertical depende da espessura da folha e de sua condição de encruamento.

A análise mostrou a variação de comportamento de uma peça estampada para montagem em embalagem metálica, normalmente utilizada para tintas e vernizes, quando tem sua espessura de matéria-prima e roteiro de tratamento térmico modificados. Se pôde perceber a sensibilidade do produto de conformação com a alteração destas variáveis. A redução da

espessura tem impacto na redução do limite de segurança. Contudo, a alteração do roteiro de recozimento feito em Caixa para o ciclo Contínuo tem efeito significativo na integridade do material.

A operação que produz a pré-forma para o Anel 04 apresentou falhas quando realizada com a folha TH415. Este efeito não foi percebido quando utilizada a folha T57 onde não houve sinais de falha do componente. Desta forma, verifica-se que a CLC é uma ferramenta importante na seleção de materiais para peças estampadas, podendo abreviar o tempo de desenvolvimento e substituir etapas de tentativa e erro no projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6602-o-que-sao-as-curvas-limite-de-conformacao#

[2] www.csn.com.br

[3] Catálogo CSN

[4] <https://web.archive.org/web/20220323115936/http://tinplatechina.com/1-tinplate.html>



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil
26th International Forging Conference

**25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de
Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG**

*25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming
Conference / 9th BrDDRG Congress*

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

Experimental and Computational Research on Hot Upsetting of Two-Grade Steel Rings

C. Obermann ⁽²⁾

G. Abate, A. Simoncelli, N. Antunez ^(1,2)

D. Martinez Kraemer, Alberto Pereyra Osenda ^(2, 3)

ABSTRACT

La temperatura utilizada en un proceso de forjado influye sobre los esfuerzos, la microestructura del material que se conforma y en menor medida sobre la fricción. Su incidencia puede cuantificarse experimentalmente mediante ensayos de compresión de anillo en una celda de forja instrumentada, y computacionalmente, a través de la técnica de simulación por elementos finitos empleando el software Simufact.Forming. Entonces, en este trabajo se compararon valores obtenidos de reducción de diámetro interno, de anillos mecanizados a partir de aceros laminados en caliente grados AISI 1010 y AISI 1020, con los coeficientes de fricción por simulación computacional y se analizó la influencia de la temperatura del herramental y la lubricación sobre el perfil deformado.

Key words — Forjado en caliente, temperatura, ensayo de compresión, ring test, simulación computacional.

1. INTRODUCCION

En la forja industrial, los esfuerzos de conformado son muy elevados [1]. De ahí la gran diferencia de tamaño existente entre la máquina principal de forja y la pieza forjada. Estas solicitaciones son soportadas por la estructura de la máquina y la matriz, manifestándose en la prensa mediante deformaciones elásticas [2] - [4] y en las matrices, por medio de deformaciones elásticas, plásticas y desgaste [5]. Asimismo, dado que el proceso es cíclico, ambas partes se encuentran sometidas a cargas de fatiga. Siendo la prensa el activo principal de toda empresa forjadora, y dado que las matrices constituyen el 10% de los costos de forja [6], es necesario implementar acciones para diseñar los procesos de forma segura y no afectar la vida útil de estos componentes tan importantes.

⁽¹⁾ Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), Bs As, Argentina.

⁽²⁾ Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Lomas de Zamora (UNLZ), Bs As, Argentina.

⁽³⁾ Facultad de Metalurgia, Universidad Nacional de Hurlingham (UNAHUR), Bs As, Argentina.

Los procesos de forjado, son el foco de continuos avances tecnológicos. En Argentina, si bien se encuentra mayoritariamente desarrollado el proceso de forjado en caliente, muchos de los avances tecnológicos que son comúnmente usados en los países líderes, no se aplican [6]. Tal es el caso de la simulación computacional por Elementos Finitos [7] y la instrumentación de las máquinas principales de forja [8]. Estas herramientas son vitales para el desarrollo de piezas net shape o near net shape a través de la forja de precisión y requieren la caracterización del material en cuanto a su resistencia a la deformación, coeficiente de fricción entre pieza y matriz, y el conocimiento preciso de las cargas durante el proceso. La no aplicación de estos métodos de trabajo, culmina en la definición de los parámetros del proceso por el método clásico de prueba y error, basado en experiencias previas. Esta situación puede traer aparejada la posibilidad de sobrecargas en matrices y prensas, por inexactitudes en las estimaciones realizadas.

En cuanto a la fricción, las investigaciones apuntan a determinar el coeficiente en función de la terminación de las superficies en contacto [9] - [10], de la velocidad de deformación [11] y del tipo y espesor de óxido de hierro que se forma sobre el material a la temperatura de forja [12].

Con relación al ensayo de compresión de anillo, empleado para determinar el coeficiente de fricción a partir de una sencilla evaluación geométrica sobre el anillo comprimido, su diseño y metodología de ensayos corresponden a los trabajos de A. Male y M. Cocroft [13].

Un trabajo previo que tiene relación directa con el presente fue realizado por A. Sánchez Egea et al [14], aunque en esa oportunidad se trabajó a temperatura ambiente y 1400 K.

En consecuencia, para colaborar con el sector forjador de Argentina en el sentido indicado, Instituto Nacional de Tecnología Industrial ha incorporado un sistema de medición de cargas para forja compuesto por una prensa hidráulica de 200 t, un horno eléctrico de hasta 1250°C y una celda de carga de 1000 t. Considerando el impacto de la vida útil de las matrices sobre los costos de una pieza forjada, que muchas empresas forjadoras argentinas tienen una sola línea de forjado y siendo que en Argentina no se dispone de los medios para medir las cargas que las herramientas de simulación podrían ayudar a determinar, en este trabajo se han realizado de forma experimental y computacional ensayos de recalado en caliente de anillos de dos grados de acero diferentes (AISI 1010 y AISI 1020), sometidos a distintos porcentajes de deformación y dos niveles de temperatura, con el objeto de ajustar un modelo virtual del citado proceso.

2. MATERIALES Y EQUIPOS

Los ensayos de compresión fueron realizados en una celda de forja constituida por una prensa hidráulica Diada de 200 t, sobre la que se encuentra instalada una celda de carga Toledo de 1000 t.

El calentamiento de los anillos fue realizado en un horno Indef (1.7 kW de potencia y temperatura máxima de 1250°C), mientras que el precalentamiento de la matriz inferior se realizó con una placa calefactora marca Indef (2.6 kW y temperatura máxima de 500 °C).



Figura 1 – Celda de forja compuesta por Horno, prensa, placa calefactora y celda de carga

La temperatura de la matriz inferior fue medida con una cámara termográfica marca Fluke, cuyo rango de medición es de 0°C hasta 650°C.

El lubricante utilizado fue una solución de grafito en agua con una concentración del 6% aplicado por pulverización sobre la superficie de la matriz inferior a una temperatura superficial de 160°C.

Para efectuar el ensayo de compresión se utilizaron placas de recalcado de acero AISI H13 templadas y revenidas a 52 HRC rectificadas a una rugosidad media aritmética $R_a = 0,6 \mu\text{m}$.

Las probetas que fueron comprimidas a una velocidad de 1.3 mm/s correspondieron a anillos cilíndricos de las siguientes medidas nominales: 19.3 mm de diámetro exterior, 9.5 mm de diámetro interior y 6.3 mm de altura, torneados a partir de barras laminadas en caliente de aceros AISI 1010 y AISI 1020.

Tabla 1: Composición química de los aceros utilizados en el ensayo de compresión de anillo

Composición Química Nominal (% en peso)						
Acero	C	Mn	P	S	Fe	HV1
AISI 1010	0.08 - 0.13	0.30 - 0.60	≤ 0.04	≤ 0.05	Balance	100
AISI 1020	0.18 - 0.23	0.30 - 0.60	≤ 0.04	≤ 0.05	Balance	115

2.1 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Se comprimieron un total de 36 anillos, correspondientes a la combinación de tres grados de deformación, dos temperaturas de calentamiento del material, dos grados de acero y tres repeticiones. Mientras que la matriz inferior fue precalentada sobre una placa calefactora, hasta alcanzar 160° sobre su superficie, y lubricada con un spray de grafito en agua, la matriz superior no fue precalentada ni lubricada.

Total de muestras	Deformación $(h_i - h_f)/h_f$ (%)	Temperatura (°C)	Aceros utilizados	N° de Repeticiones
36	25, 40 y 50	800 y 1200	AISI 1010 y 1020	3

Tabla 2: Factores y sus correspondientes niveles para el ensayo de compresión de anillo

Para la realización de las compresiones se sujetaron tres probetas sobre un dispositivo de acero inoxidable diseñado al efecto, para disminuir los tiempos de contacto entre los anillos y la matriz inferior. Los anillos y el dispositivo fueron calentados dentro del horno y luego trasladados con una pinza de acero inoxidable hasta la superficie de la matriz inferior dentro de la prensa hidráulica. De todas las muestras se registraron las dimensiones geométricas Radio interior inicial (R_i), altura inicial (h_i) y posterior al conformado radio interior final (R_f) y altura final (h_f).

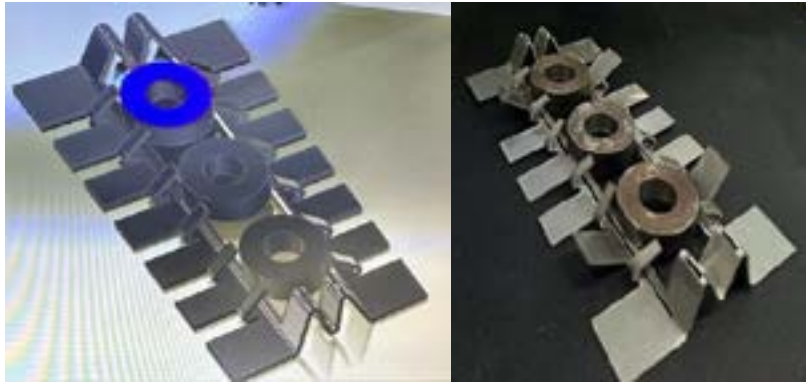


Figura 2 – Dispositivo para la sujeción de las probetas

2.2 SIMULACION POR ELEMENTOS FINITOS

Se efectuaron simulaciones por elementos finitos con el software Simufact.Forming con el objetivo de comparar el comportamiento de los anillos comprimidos en la prensa con anillos virtuales, y a partir de allí estimar el coeficiente de fricción resultante.

A partir de la aplicación de la herramienta de simulación se evaluaron seis grados de deformación para cuatro niveles de fricción comprendidos entre $\mu=0.12$ y $\mu= 0.18$ y dos temperaturas, constituyendo 48 puntos con los que se trazaron las curvas de calibración que vinculan el coeficiente de fricción con la reducción porcentual de radio interno $(R_i-R_f)/R_i$ de las probetas en función del grado de compresión $(h_i-h_f)/h_i$ observables en la Figura 7.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

La compresión de los anillos en el dispositivo flexible disminuyó el tiempo de contacto contra la matriz inferior limitando la transferencia de calor por conducción, sin interferir en su libre deformación. Por su parte las simulaciones por elementos finitos permitieron regular en que momento de la carrera el soporte deposita los anillos sobre la matriz inferior.



Figura 3 – Comportamiento del soporte flexible de los anillos

Dada la deformación que se produce en el dispositivo de sujeción de las probetas solo en las condiciones de mayor deformación no fue posible reutilizarlos.



Figura 4 – Simulación del comportamiento del soporte flexible de los anillos

El proceso de deformación registrado con imágenes termográficas nos muestra la temperatura del herramental superior e inferior. Sin embargo, por su rango de medición no fue posible aplicarlo a la

medición de los anillos.

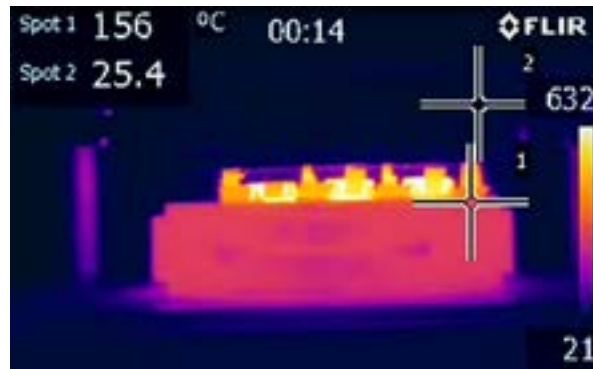


Figura 5 – Termografía obtenida durante el proceso de deformación

La matriz inferior, sobre la cual se aplicó el lubricante se encontró a una temperatura en promedio de unos 156°C en el momento de la deformación. La matriz superior, que no fue precalentada ni lubricada, se midió una temperatura de unos 25°C.

3.1 Determinación del coeficiente de fricción en relación con la simulación

Todos los anillos fueron relevados geoméricamente antes y después de ser deformados. Con los valores iniciales se calcularon la reducción de diámetro interno y la variación de altura, para los tres grados de deformación analizados, las dos temperaturas y los dos tipos de acero utilizados.

En la figura siguiente se muestran la totalidad de los ensayos experimentales. Se realizaron cuatro ajustes exponenciales para cada material a las dos temperaturas ensayadas.

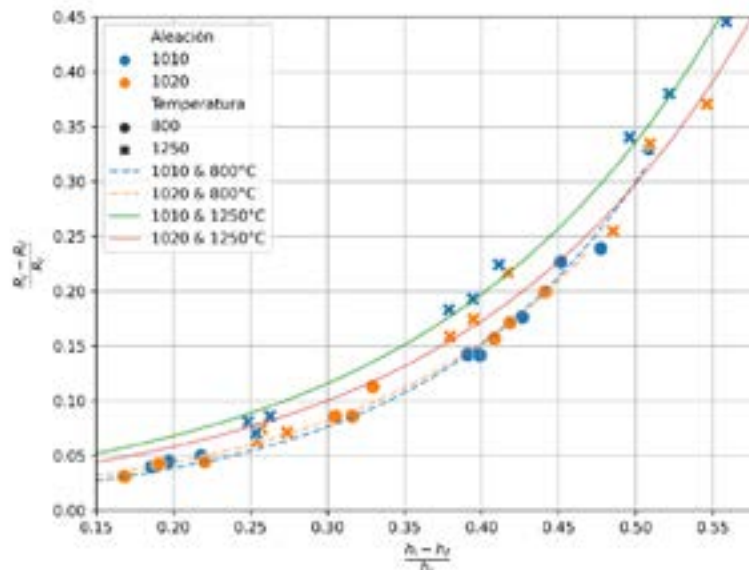


Figura 6 - Gráfica de reducción % de diámetro interno vs grado de deformación

La reducción del diámetro interno fue mayor para todas las probetas ensayadas a la temperatura de 1250°C lo cual puede observarse en las curvas de trazo continuo, en tanto que, con relación al tipo de acero, no se pudieron apreciar diferencias significativas sobre la reducción de diámetro.

Sobre las curvas obtenidas por simulación para coeficientes de fricción entre $\mu=0.12$ y $\mu=0.18$ se superpusieron los datos experimentales. Analizando la Figura 7, para la temperatura de 800°C, el comportamiento de ambos aceros (AISI 1010 y AISI 1020) con relación a la reducción de diámetro interno no muestra diferencias significativas y muestran un buen ajuste con la curva simulada de $\mu=0.14$.

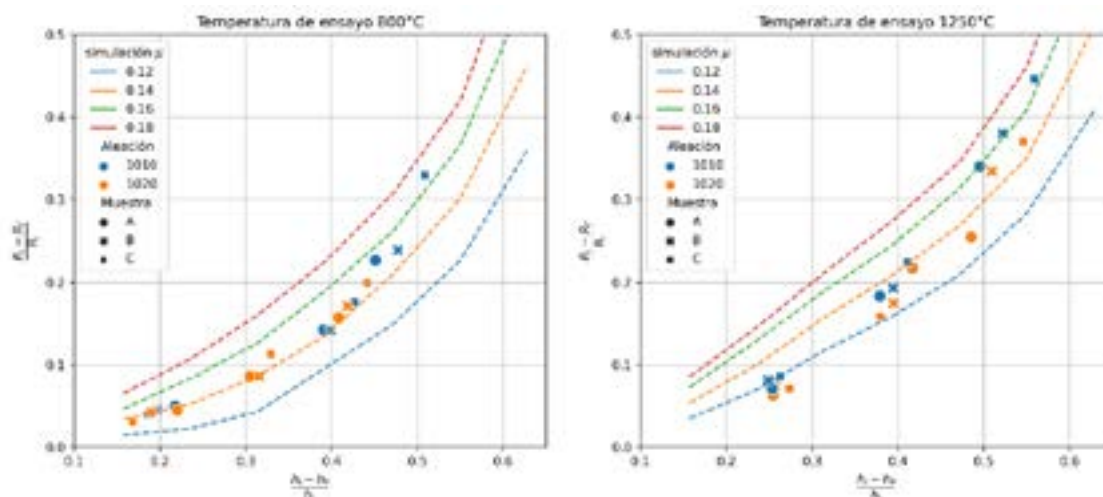


Figura 7 - Coeficiente de fricción obtenido por simulación para 800°C y 1250°

En un análisis similar a 1250°C, el comportamiento de ambos aceros con relación a la reducción de diámetro fue similar. Sin embargo, a medida que aumenta el porcentaje de deformación, los coeficientes de fricción también lo hacen partiendo de valores cercanos a 0.12 para deformaciones entre el 15% y el 20% y alcanzando casi 0.18 para deformaciones mayores al 50%.

6. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones de este trabajo son las siguientes:

- La utilización del dispositivo para la sujeción de las probetas redujo el tiempo de contacto entre los anillos y la matriz inferior, ampliando las posibilidades en cuanto a disminuir el tamaño de las probetas, o utilizar máquinas de baja velocidad de desplazamiento.
- Utilizar arreglos de tres compresiones efectuadas en simultáneo permite adecuar la escala de medición para tener condiciones registrables.
- Se puede observar una mayor reducción de diámetro conforme aumenta la temperatura del conformado de los anillos. Este aspecto puede ser observado tanto en las muestras experimentales como así también en las simulaciones realizadas.

ACKNOWLEDGMENT

Los autores de este trabajo desean agradecer al Dr. Mauro Martín de Acindar por facilitarnos los aceros ensayados y al Ing. Alberto Forcato de Fuchs por la donación del grafito utilizado durante las pruebas.

References

- [1] BONNEMEZON A. y MARTINEZ KRAHMER D, *Práctica Industrial de la Forja en Caliente*, Editorial Nueva Librería, Buenos Aires, 2012
- [2] MARTINEZ KRAHMER D. et al, Short-Cut Method to Assess a Gross Available Energy in a Medium-Load Screw Friction Press, *Metals* 2018, 8, 173; DOI: 10.3390/met8030173.
- [3] DEMEC P, PALASCAKOVA D. Simplified Calculation of the Eccentric Press Stiffness. *Applied Mechanics and Materials*, vol. 613, Trans Tech Publications, Ltd., Aug. 2014, pp. 402–407. doi:10.4028/www.scientific.net/amm.613.402.
- [4] MARTINS V, von PRITZELWITZ P, SINATORA A e SCHAEFFER L. Avaliação de tensões em uma prensa de 750 t com auxílio de um software CAE. *Corte & Conformação de Metais* – Abril 2011
- [5] ZHENG X et al (2023). Die wear analysis and pre-forging process optimization of hot forging for automobile flange fork. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 126. 1-16. 10.1007/s00170-023-11235-1.
- [6] BONNEMEZON A, ABATE G y MARTINEZ KRAHMER D, *Ingeniería del Forjado Moderno*, Veicorgraf, Buenos Aires, 2014

- [7] HAWRYLUK, M et al. Analysis of the Industrial Process of Producing a Hub Forging Used in Motorcar Power Transmission Systems—A Case Study. *J. Manuf. Mater. Process.* 2021, 5, 32. <https://doi.org/10.3390/jmmp5020032>
- [8] DURAND C et al. Contribution to characterization of metal forming machines: application to screw presses. *Procedia Manufacturing*, Volume 15, 2018, Pages 1024-1032, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.391>.
- [9] KIM H. et al, Effects of surface finish and die temperature on friction and lubrication in forging, *Procedia Engineering* 81 (2014).
- [10] CRISTINO V. et al, The Role of Interfaces in the Evaluation of Friction by Ring Compression Testing, *Experimental Techniques* 39 (2015).
- [11] ASAI K. et al, Estimation of frictional property of lubricants for hot forging of steel using low-speed ring compression test, *Procedia Engineering* 81 (2014).
- [12] BEHRENS B. et al, Sensitivity Analysis of Oxide Scale Influence on General Carbon Steels during Hot Forging, *Metals* 2018, 8, 140; DOI: 10.3390/met8020140.
- [13] MALE A, COCROFT M. A method for the determination of the coefficient of friction of metals under condition of bulk plastic deformation, *J. Inst. Metals* 1964-1965, 93, pp. 38-46.
- [14] SANCHEZ EGEA A, MARTYNENKO V, ABATE G, MARTINEZ KRAHMER D. Friction capabilities of graphite-based lubricants at room and over 1400 K temperatures. *Int J Adv Manuf Technol* 102, 1623–1633 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03290-4>

TOOL LIFE CYCLE EVALUATION FOR MACHINING OF 38MNV56 MICROALLOYED STEEL BY COOLING CONTROL AFTER HOT FORGING

Guilherme Oliveira Goulart ⁽¹⁾
Alisson da Silva Duarte ⁽²⁾
Tomaz Batista Petracco Filho ⁽³⁾
Juliano de Souza da Silva ⁽⁴⁾
Cleiton Ariel Nunes ⁽⁴⁾
Santiago Henkel Blauth ⁽⁵⁾
Carlos Alexandre dos Santos ⁽⁶⁾

ABSTRACT

Machining process parametrizations are widely studied and widespread. Research pursues to establish correlation between machining forces, tool wear, and cutting cooling fluid efficiency with operational parameters such as feed rate, depth of cut, and cutting speed, and metallurgical characteristics of the material such as microstructure and hardness. This work aims to determine the best cooling condition after the hot forging process of DIN 38MnSV6 microalloyed steel to improve tool life during machining. Samples with 36,51 mm diameter and 160 mm length were extracted from hot-rolled cylindrical bars, heated in a resistive furnace at 1.220 °C, held for 28 minutes until complete thermal homogenization, and hot-forged in a universal test machine with compression rate of 4,7 %/min (compression speed of 7.5 mm/s), to simulate industrial conditions. Different cooling rates of 0.8 °C/s, 1.0 °C/s, 1.8 °C/s and 2.9 °C/s after hot forging were investigated. After forging process, samples were machined with the following parameters: 0,2 mm/rev feed rate, 130 m/min cutting speed and 0,5 mm depth rate. Correlations between the wear level VB with cooling rates applied in the samples will be attained. To understand wear mechanism(s), microstructure, grain size, and fiber orientation of the samples after machining were analyzed, as well as features such as hardness, superficial roughness tensile testing responses after machining. The results showed that rupture limit tensile and deformation are possible explanation of high tool wear and they are predicted through cooling control, and they are better parameter than only hardness control.

Key words — 38MnVS6 Microalloyed Steel, Hot Forging, Controlled Cooling, Microstructure, Tool Life Cycle Assessment.

⁽¹⁾ M. Sc., Pontifícia Universidade Católica (PUCRS), guilherme.oliveira91@edu.pucrs.br

⁽²⁾ Prof. Dr., Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

⁽³⁾ M. Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

⁽⁴⁾ Mestrando, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

⁽⁵⁾ Product Designer, Maxiforja Componentes Automotivos Ltda

⁽⁶⁾ Prof. Dr., Pontifícia Universidade Católica (PUCRS)

1. INTRODUÇÃO

Os processos de manufatura foram desenvolvidos para auxiliar as funções exercidas pelos seres humanos, com geometrias não possíveis de serem obtidas na natureza. Ao passar do tempo, tais processos evoluíram para atingir requisitos cada vez mais restritos, com montagens e geometrias cada vez mais complexas. Entre estes processos, o forjamento objetiva a deformação, no regime plástico, para alteração de geometria e melhora nas propriedades mecânicas, conforme Semiatin [1]. Ainda dentro deste grupo de processo de manufatura, tem-se o forjamento a quente, onde a temperatura da peça é elevada até aproximadamente 2/3 da temperatura de fusão, visando maiores deformações com menores tensões aplicadas, conforme Nahrman e Matzenmiller [2]. Este processo permite a obtenção de grãos refinados e geometrias de elevada complexidade, mas não atingindo tolerâncias restritas Kaur *et al* [3].

Contudo, o processo de forjamento a quente apresenta limitação com relação às tolerâncias com elevado grau de restrição, condição esta aplicada para montagens de forma geral como mancais, roscas, pino passante, entre outros. Tais condições podem ser obtidas por meio de processos de usinagem, como por exemplo torneamento, que consistem na remoção de material pelo contato de ferramentas com a aresta cortante de uma ferramenta de corte, onde a peça ou a ferramenta pode se movimentar em alta velocidade, cisalhando parte do material e permitindo peças com tolerâncias restritas Sarikaya *et al* [4].

Dados levantados em ambiente fabril traçam uma relação entre a dureza da peça forjada com a vida útil da ferramenta de usinagem, sendo esta relação válida para aços carbono e aços endurecidos, porém, para aços microligados esta correlação não tem se mostrado válida em bibliografias, conforme Galibois *et al* [5]. Durante a usinagem de peças forjadas em aço microligado, como braços de direção, braços de ligação, terminais, etc, a relação estabelecida no ambiente fabril também não se mostrou válida, variando em casos onde a relação às vezes é direta e as vezes é indireta quanto ao desgaste da ferramenta de usinagem com a dureza da peça, originando assim a inspiração para desenvolvimento desta dissertação, buscando parâmetros de processos do processo de forjamento que influenciam o desgaste dos insertos dos processos de usinagem.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Nos procedimentos experimentais, o trabalho foi dividido seguindo a ordem: Aquecimento / Conformação / Jateamento / Usinagem.

2.1. Aquecimento

A etapa de aquecimento consistiu em estipular os parâmetros. O laboratório contava com um forno Sanchis ESP de 8 kW e 220 V, com temperatura máxima de 1.450 °C e o controle de temperatura era realizado por meio de um termopar tipo S. O forno foi configurado para aquecimento em 1.220 °C, por 28 minutos de encharque.

2.2. Conformação

O processo foi realizado por meio da utilização de uma prensa de ensaios mecânicos Shimadzu modelo AG-IC 300 kN com as matrizes conforme projeto apresentado na Figura 1.

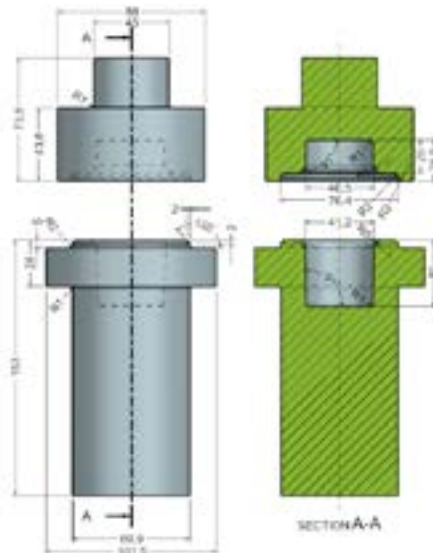


Figura 1 – Geometria das matrizes de conformação

A conformação foi realizada com uma velocidade de 7,5 mm/s, respeitando limites de segurança estipulados para prensa pelo laboratório, o processo inicial e final é demonstrado na Figura 2.



Figura 2 - Estágios iniciais e finais da conformação.

Foram forjadas 28 peças e divididas em 4 grupos divididos em:

- 07 Peças forjadas e resfriadas ao ar, a uma taxa de 0,8 °C/s;
- 07 Peças forjadas e resfriadas com convecção forçada, a uma taxa de 1,0 °C/s;
- 07 Peças forjadas e resfriadas com convecção forçada, a uma taxa de 1,8 °C/s;
- 07 Peças forjadas e resfriadas com convecção forçada, a uma taxa de 2,9 °C/s.

Tais taxas foram estabelecidas buscando abranger as condições de resfriamento aplicadas na indústria, por meio de controle de potência de ventiladores e velocidade de esteira, de forma a ter condições simulando ambos os extremos de possibilidade bem como valores intermediários, correspondendo também as possibilidades do material, dado diagrama TTT, conforme Figura 3.

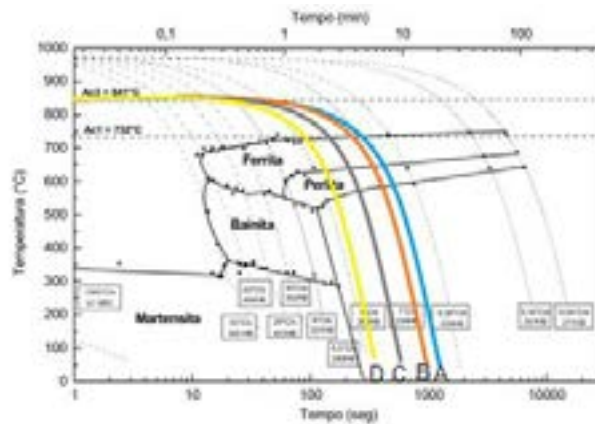


Figura 3 - Taxas de resfriamento em diagrama TTT aço DIN 38MnVS6 para as taxas de resfriamento (A) 0,8 °C/s, (B) 1,0 °C/s, (C) 1,8 °C/s e (D) 2,9 °C/s.

Com o objetivo de simular a etapa de resfriamento controlado, foi montado um dispositivo com pistola de ar comprimido e variando a distância do jato na peça, pós conformação. Este dispositivo pode ser visto na Figura 4.



Figura 4 - Dispositivo de resfriamento controlado.

2.3. Jateamento

Como o processo de forjamento a quente resulta em peças com carepa, oriundas da oxidação durante o aquecimento e durante a conformação propriamente dita, sendo a mesma algo responsável por elevar a degradação de insertos durante operações de usinagem, foi estabelecida uma operação de jateamento em todas as 28 peças conformadas, sendo realizado em uma cabine de jateamento por sucção CMV® de 110 V e 60 Hz, com motor de 0,25 kW e 3.390 RPM com bocais de sucção 3/4" e vazão mínima de 1,5 m³/h e vazão máxima de 4,8 m³/h, com microesferas de vidro.

2.4. Usinagem

O processo de usinagem foi estabelecido como processo de torneamento em um torno CNC ROMI, modelo Centur 30D. A operação de controle consistiu em fixar o lado inferior das peças conformadas e usinar 60 mm do comprimento da peça até um diâmetro de 15 mm, a fixação da peça nas castanhas é exemplificada na Figura 5.



Figura 5 - Região de fixação para usinagem.

Para o processo de usinagem controlado foram utilizados os parâmetros apresentados na Tabela 1, objetivando a geometria apresentada na Figura 6.

Tabela 1 - Parâmetros de usinagem.

Velocidade (rpm)	Velocidade de Corte (m/min)	Profundidade de Corte (mm)	Avanço (mm/rev)
630 – 2.760	130	0,5	0,2

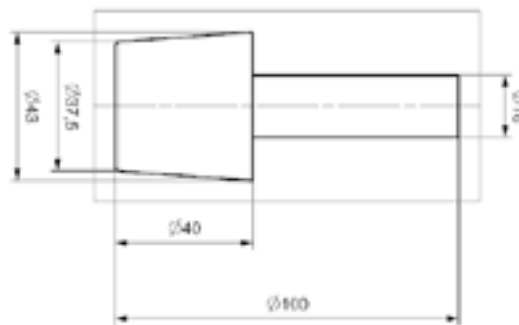


Figura 6 - Dimensionamento da peça usinada objetivada.

A análise da usinagem foi realizada em quatro insertos TNMA160408 UC5115, da marca Diaedge (Mitsubishi Materials), um por lote, insertos novos, identificados a cada final de lote usinado. Cada inserto foi utilizado para usinagem de 6 peças, pois a 7ª peça de cada lote foi seccionada e tiveram análise de dureza, fibragem e análise microestrutural. Os insertos foram separados e analisados via MEV. O critério utilizado na análise dos insertos foi a análise do desgaste VB, que basicamente consiste na relação entre abrasão e desgaste das iterações entre a peça e o inserto, conforme representado na Figura 7.

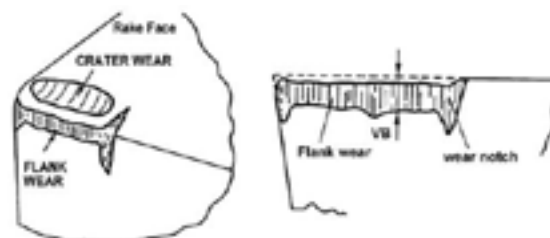


Figura 7 - Desgaste de inserto VB [6].

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para avaliação do material fornecido, foi realizada uma validação da composição química do material, sendo obtida a composição apresentada na Tabela 2. Conforme resultados, o aço fornecido estava de acordo com a tolerância especificada.

Tabela 2 - Composição química do aço microligado DIN 38MnVS6 conforme fornecido.

Elemento (% em massa)	Especificado		Medido
	Mín.	Máx.	
C	0,34	0,41	0,384
Si	0,15	0,8	0,560
Mn	1,2	1,6	1,390
P	-	0,025	0,007
S	0,02	0,06	0,023
V	0,08	0,2	0,099
Cr	-	0,3	0,167

Antes da etapa de conformação, foi realizada uma análise do comportamento de resfriamento do material com o objetivo de correlacionar a taxa de resfriamento com uma distância controlada da pistola de ar comprimido utilizada para simular o processo de resfriamento controlado com esteira e ventiladores utilizados na indústria. Com este teste, foi obtido o gráfico mostrado na Figura 8.

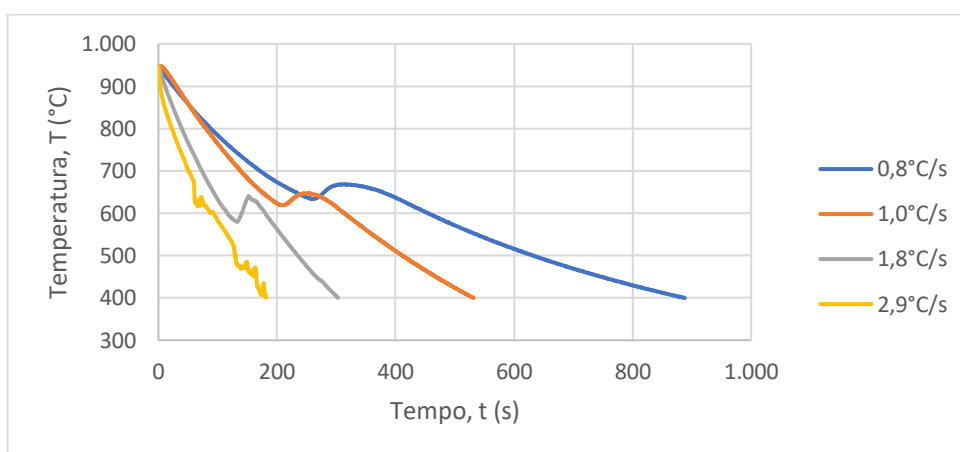


Figura 8 - Gráfico comparativo das taxas de resfriamento.

Com o gráfico apresentado na Figura 8 e conforme estabelecido no diagrama TTT do material, acima de 841 °C o material possui matriz austenítica e abaixo de aproximadamente 732 °C o material mantém, até temperatura ambiente, matriz ferrítica-perlítica nas taxas de resfriamento estudadas. Por fim, entre 550 °C e 732 °C é o intervalo onde ocorre a transformação microestrutural perlítica-ferrítica, mantendo a microestrutura até temperatura ambiente, variando apenas o tamanho de grão. Como última análise, os resultados obtidos das taxas de resfriamento foram sobrepostos no diagrama TTT do material e apresentadas na Figura 3.

Desta forma, o processo de conformação pode ser realizado com o processo de resfriamento controlado padronizado. 28 corpos de prova foram cortados para dimensão de 160 mm, divididos em 4 lotes de 7 peças. Como a etapa de conformação não houve variação no processo, os dados de força de conformação podem ser analisados na Figura 9.

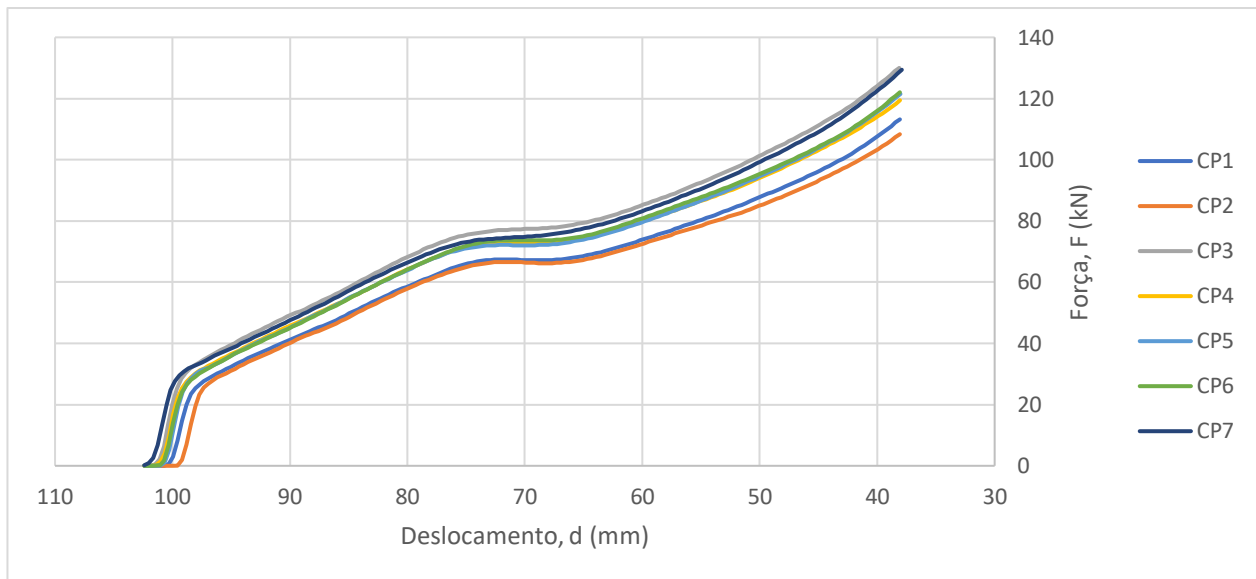


Figura 9 - Força de conformação por deslocamento - Lote 4 e simulação.

É importante analisar o gráfico por partes, a partir de 75 mm da conformação o material entra em patamar com relação à força pois sofre uma recristalização dinâmica a partir deste ponto o material volta a ter um aumento na força de conformação, tendo em vista que começa um encruamento do material. Além disso os 28 corpos de prova resultaram em uma força de conformação semelhante, sendo sintetizados em apenas um grupo de dados, apresentado no gráfico da Figura 9.

Os 24 corpos de prova foram jateados para uma limpeza superficial e iniciada a operação de usinagem. Os outros 4 corpos, 1 de cada lote, seguiram para análise microestrutural, dureza e fibragem. Todos os 24 corpos de prova foram usinados, chegando à geometria especificada na figura 2.8, exibido a peça real na Figura 10.



Figura 10 - Corpo de prova usinado.

Com relação aos corpos de prova usinados, foi realizada análise da rugosidade na região usinada, chegando aos valores apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores de rugosidade obtidos dos corpos de prova.

Taxa 0,8 °C/s	Taxa 1,0 °C/s	Taxa 1,8 °C/s	Taxa 2,9 °C/s
4,746 μm	2,374 μm	1,752 μm	1,809 μm
7,921 μm	2,476 μm	1,845 μm	1,575 μm
8,801 μm	1,092 μm	1,889 μm	1,638 μm

Conforme observado na Tabela 3, os valores obtidos da rugosidade são inversamente proporcionais à taxa de resfriamento empregada no lote. Seguindo as análises empregadas na etapa de usinagem, os cavacos de cada lote foram separados, conforme Figura 11.



Figura 11 - Cavacos separados conforme processos de usinagem para taxa de resfriamento (a) 0,8 °C/s, (b) 1,0 °C/s, (c) 1,8 °C/s e (d) 2,9 °C/s.

Os cavacos foram cortados em tamanhos menores e passaram por uma análise via MEV, a Figura 12 apresenta o perfil interno do cavaco analisado. É possível verificar que conforme a taxa de resfriamento utilizada, o comprimento da banda de cisalhamento aumentou, onde para as taxas de 0,8 °C/s e 1,0 °C/s o comprimento máximo ficou em aproximadamente 90 µm, para a taxa de 1,8 °C/s o comprimento aumentou para 140 µm e para a última taxa de resfriamento de 2,9 °C/s, o comprimento obtido ficou em aproximadamente 155 µm. De forma a facilitar a interpretação, foi montado um gráfico relacionando o comprimento da banda cisalhada com a taxa de resfriamento, apresentado na Figura 13.

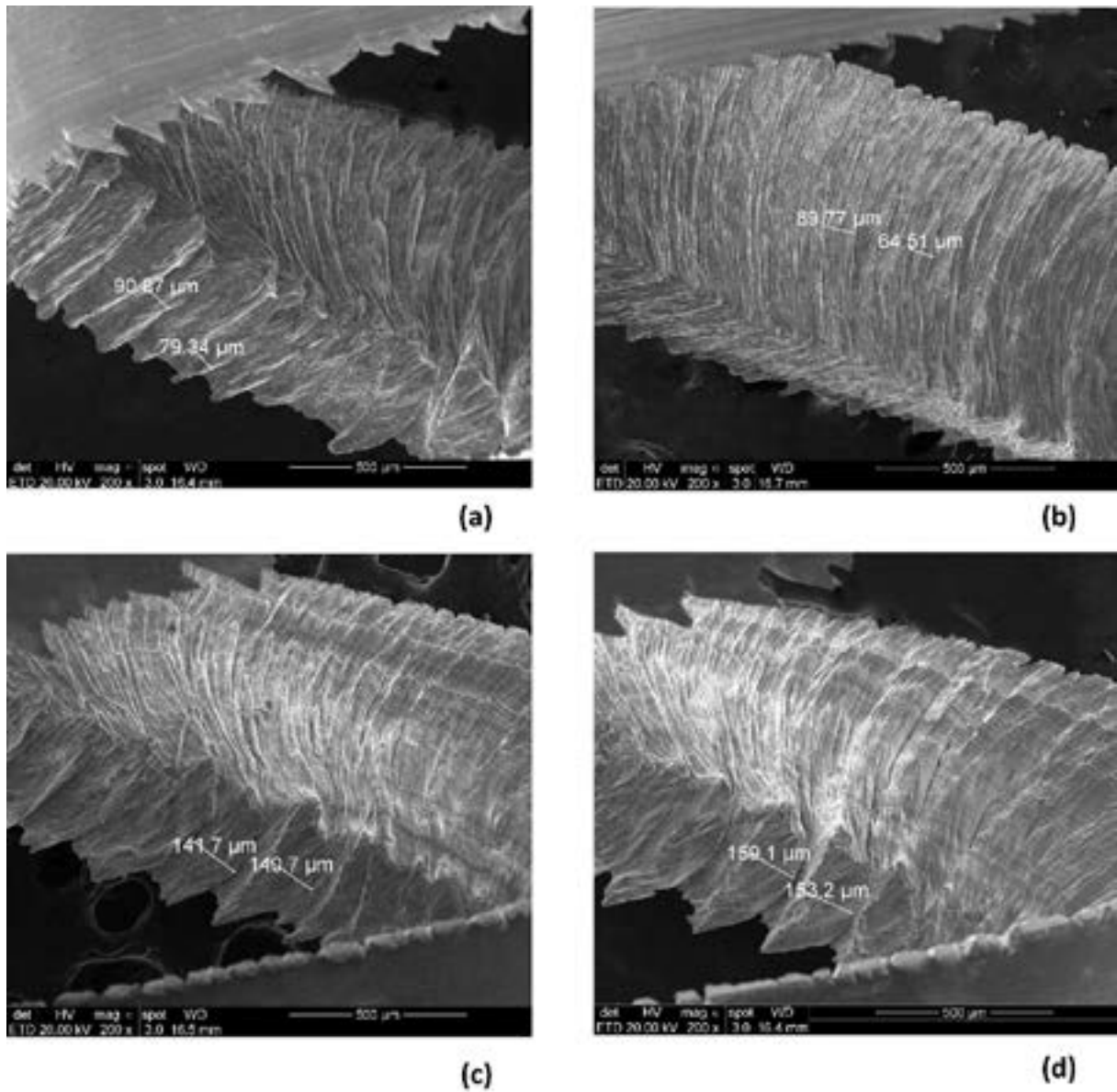


Figura 12 - Análise MEV com aplicação 200x de cavaco oriundo da usinagem das amostras conforme taxa de resfriamento (a) 0,8 °C/s, (b) 1,0 °C/s, (c) 1,8 °C/s e (d) 2,9 °C/s.

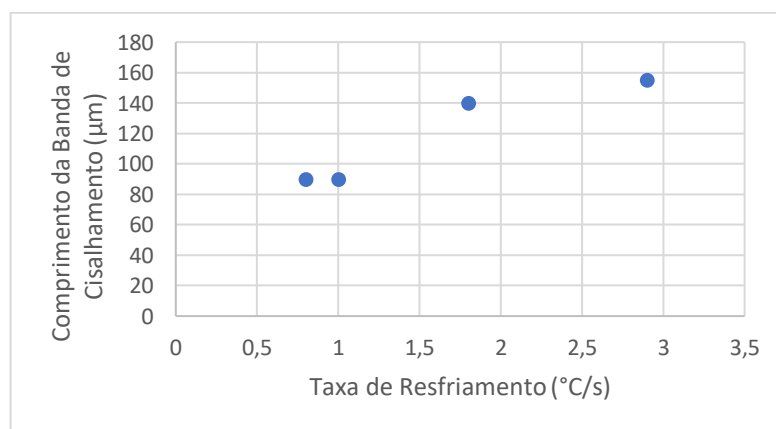


Figura 13 - Correlação entre taxa de resfriamento e comprimento da banda de cisalhamento do cavaco.

Ainda dentro do escopo dos resultados obtidos no processo de usinagem, a Figura 14 apresenta o desgaste VB obtido nos inserts de usinagem.

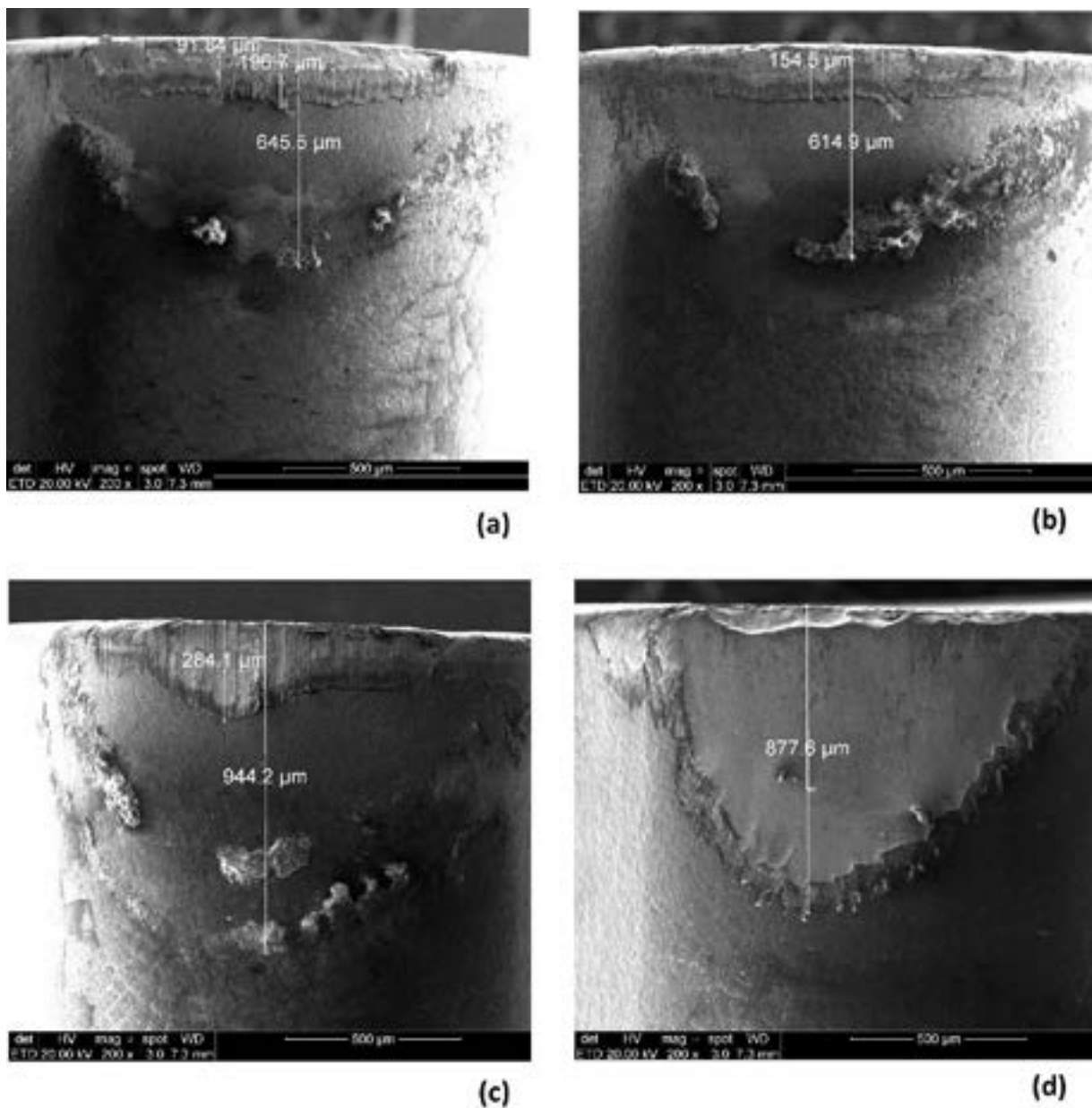


Figura 14 - MEV com 200x ampliação da aresta de corte dos inserts utilizados para usinagem de acordo com as taxas de resfriamento (a) 0,8 °C/s, (b) 1,0 °C/s, (c) 1,8 °C/s e (d) 2,9 °C/s.

Conforme resultados obtidos via MEV, apresentados na Figura 14, é possível perceber que o desgaste ocorreu de forma crescente com a relação à taxa de resfriamento, para facilitar a visualização, foi elaborado o gráfico apresentado na Figura 15.

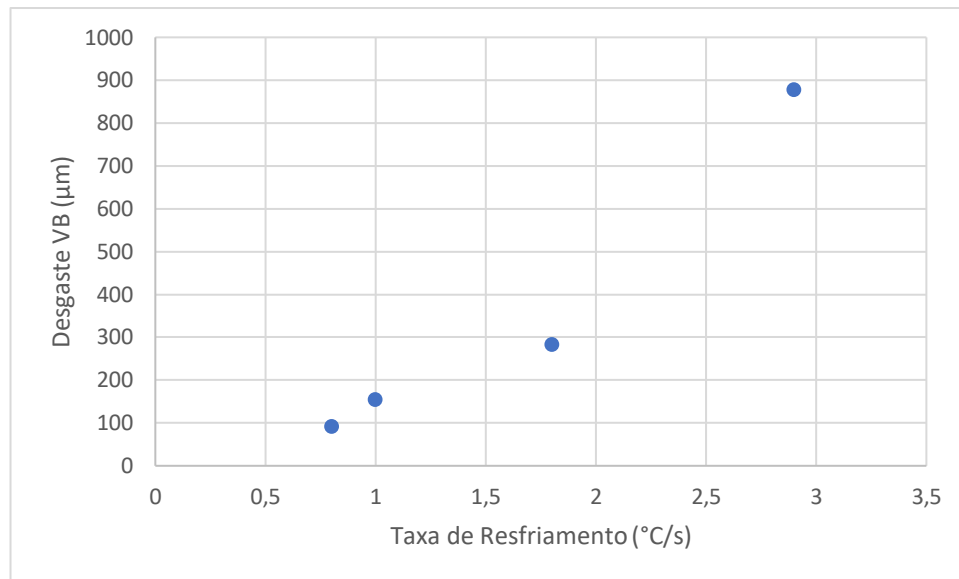


Figura 15 - Correlação entre taxa de resfriamento e desgaste VB.

É possível observar que a taxa de 2,9 °C/s apresentou um desgaste mais severo que as demais taxas, não houve incidência de material aderido no inserto, condição evidenciado nas demais três taxas de resfriamento, de forma que na taxa de resfriamento de 1,8 °C/s foi encontrado material aderido à 930 µm da aresta de corte e para as condições de 1,0 °C/s e 0,8 °C/s foi encontrado material à aproximadamente 630 µm. Entrando nas análises metalúrgicas, a primeira foi análise de fibragem, apresentada na Figura 16.

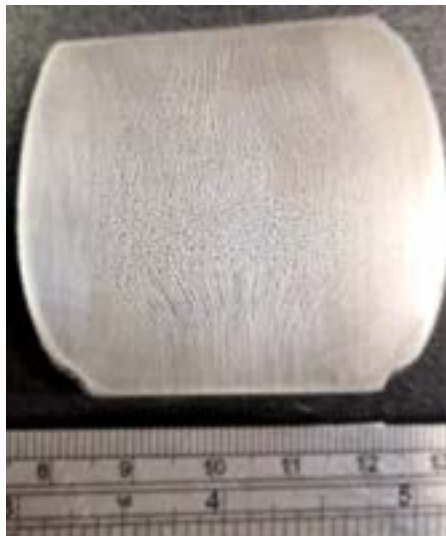


Figura 16 - Fibragem da conformação nos corpos de prova.

Tal condição foi prevista de forma satisfatória na simulação, podendo então ser imaginada uma variação entre o tamanho de grão entre núcleo e meio raio da amostra, condição esta confirmada pela metalografia, apresentada na Figura 17.

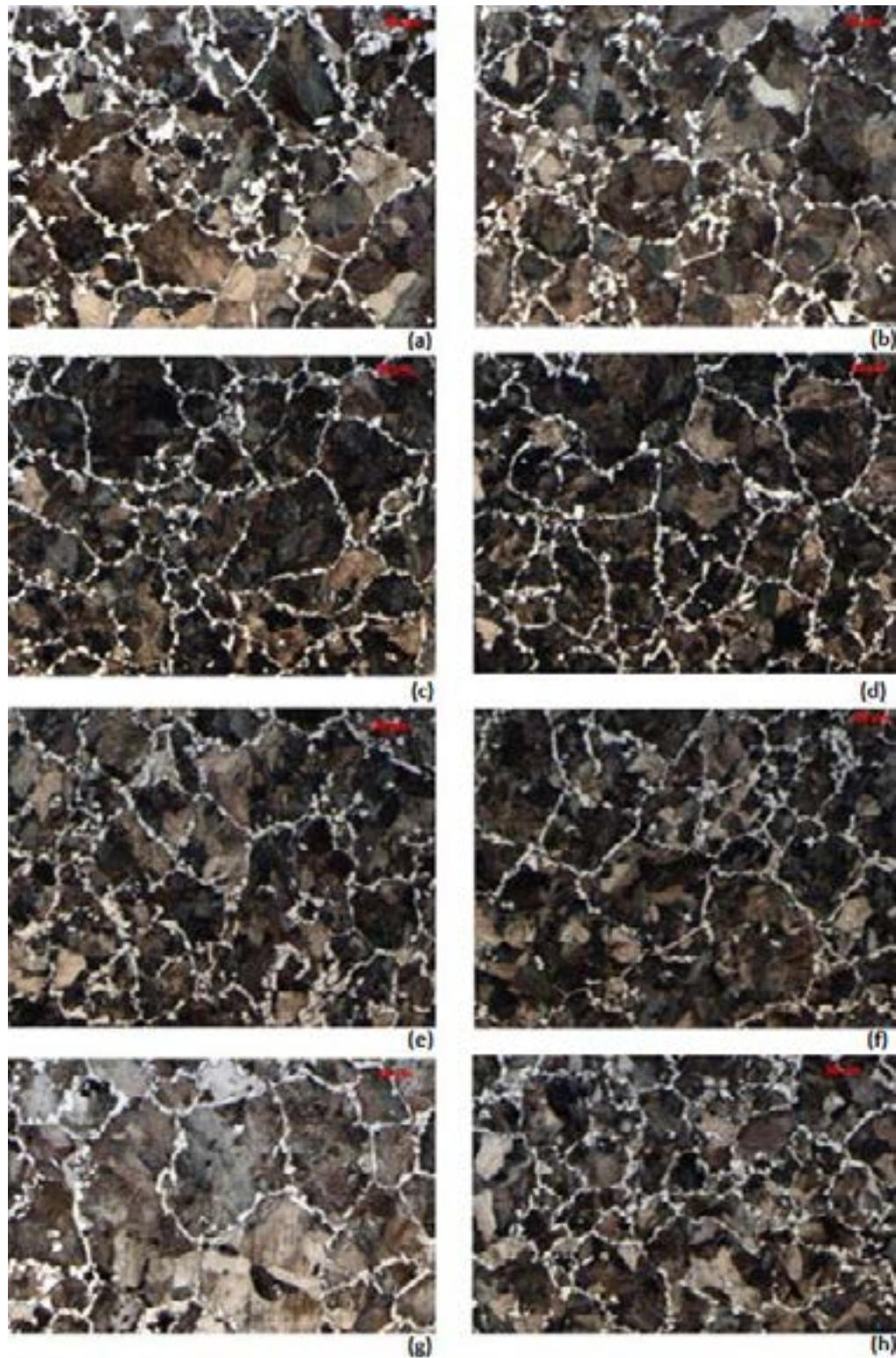


Figura 17 - Microestrutura obtidas as amostras em 200 x conforme região e taxa de resfriamento conforme (a) Núcleo 0,8 °C/s, (b) Meio Raio 0,8 °C/s, (c) Núcleo 1,0 °C/s, (d) Meio Raio 1,0 °C/s, (e) Núcleo 1,8 °C/s, (f) Meio Raio 1,8 °C/s, (g) Núcleo 2,9 °C/s e (h) Meio raio 2,9 °C/s.

Por meio da metodologia estabelecida na norma ASTM E112 – 13, pelo método do intercepto linear de Heyn, foram obtidos os tamanhos de grão conforme Tabela 4.

CP-04	0,18	905,71
CP-05	0,18	913,67
2° LOTE	Deformação (adm)	Limite de Resistência à Tração (MPa)
CP-01	0,17	947,41
CP-02	0,14	940,49
CP-03	0,15	943,14
CP-04	0,14	954,93
CP-05	0,16	951,98
3° LOTE	Deformação (adm)	Limite de Resistência à Tração (MPa)
CP-01	0,14	958,61
CP-02	0,12	939,16
CP-03	0,15	957,43
CP-04	0,15	929,14
CP-05	0,15	991,77
4° LOTE	Deformação (adm)	Limite de Resistência à Tração (MPa)
CP-01	0,12	953,75
CP-02	0,13	987,06
CP-03	0,13	984,99
CP-04	0,14	969,52
CP-05	0,12	961,56

Com base na análise estatística dos valores obtidos, foi possível verificar que não há variação nas deformações entre as taxas de 0,8 °C/s, 1,0 °C/s e 1,8 °C/s, nem para as taxas 1,0 °C/s, 1,8 °C/s e 2,9 °C/s mas foi encontrada uma diferença, com 95 % de confiança, entre as taxas 0,8 °C/s e 2,9 °C/s. Com relação ao limite de resistência à tração é possível afirmar que existe uma diferença entre as taxas de resfriamento de 0,8 °C/s, resfriada ao ar, quando comparada às taxas referente à convecção forçada de 1,0 °C/s, 1,8 °C/s e 2,9 °C/s. Conforme os resultados obtidos no desgaste do inserto, avaliados em conjunto dos resultados do ensaio de tração, a hipótese é que a deformação explique a diferença pronunciada entre os desgastes das três primeiras taxas de resfriamento, quando comparadas com a taxa de 2,9 °C/s. Após análise estatística geral, foi realizada uma avaliação da normalidade, depois análise das variâncias e por fim um gráfico de intervalos, sendo estas análises realizadas para aplicação de uma ANOVA, chegando aos resultados apresentados na Figura 19.

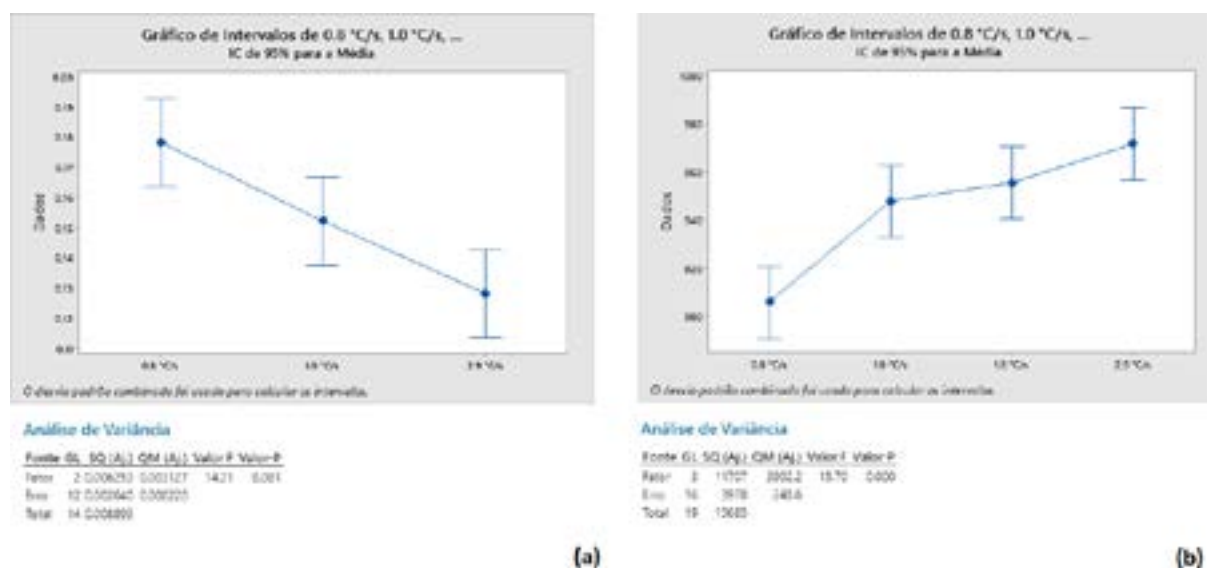


Figura 19 - Estudo ANOVA (a) deformação e (b) limite de resistência à tração.

Um dos lotes de análise da deformação não apresentou normalidade, mas como foi um valor intermediário, o mesmo foi desconsiderado dos estudos da ANOVA. Demais valores resultaram então em um p valor de 0,001 para o estudo da deformação e 0,000 para o estudo do limite de resistência à tração, com isso é possível afirmar com 95% de confiabilidade que as médias encontradas são diferentes e a deformação reduz, conforme há um aumento na taxa de resfriamento e o limite de resistência à tração aumenta, conforme é aumentada a taxa de resfriamento.

Desta forma, o trabalho encerra apontando que a provável influência para a variação da vida útil dos insertos, pode ser originada do desgaste variado, ao qual o limite de resistência à tração e a deformação se mostraram como prováveis propriedades responsáveis por tal comportamento, ainda foi possível estabelecer que a dureza se mostra como um parâmetro de controle errôneo para tentar prever a vida útil das ferramentas de usinagem. Com isso, este trabalho pode ser replicado na indústria mediante avaliação dos perfis de resfriamento das peças, e conforme no exemplo apresentado no trabalho, o controle de velocidade de esteira e acionamento de ventiladores têm um forte impacto nas propriedades mecânicas dos componentes forjados, que por sua vez degradam os insertos de forma mais acentuada.

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, foi possível avaliar os impactos da taxa de resfriamento com relação às propriedades mecânicas, formação de cavaco e desgaste dos insertos. A composição química do material cumpria os requisitos apresentados em norma.

4 Foi encontrada uma correlação inversamente proporcional entre a deformação e a taxa de resfriamento, e de forma proporcional entre o limite de resistência à tração a as taxas, de forma que para uma taxa de 0,8 °C/s foi encontrado um limite de resistência à tração médio de $905,83 \pm 13,25$ MPa com uma deformação de $0,178 \pm ,02049$, para a taxa de 1,0 °C/s foi encontrado um limite de resistência à tração de $947,59 \pm 5,99$ MPa e deformação de $0,152 \pm 0,01304$, já para a taxa de 1,8 °C/s foi encontrado um limite de resistência à tração de $955,2 \pm 23,9$ MPa e deformação de $0,142 \pm 0,01304$ e por fim, para a taxa de resfriamento de 2,9 °C/s foi encontrada um limite de resistência à tração de $971,38 \pm 14,51$ MPa com uma deformação de $0,128 \pm 0,0837$.

Em relação ao desgaste dos insertos, foi avaliado o desgaste VB gerando no inserto para cada taxa de resfriamento, chegando aos valores de 196,7 µm, 154,5 µm, 284,1 µm e 877,6 µm, para as taxas de resfriamento de 0,8 °C/s, 1,0 °C/s, 1,8 °C/s e 2,9 °C/s respectivamente. Por meio das análises estatísticas, assumindo que os valores de 196,7 µm, 154,5 µm e 284,1 µm são próximos para identificar como uma diferença significativa, o limite de resistência à tração se mostrou como uma possível explicação para o desgaste mais severo na condição de resfriamento 2,9 °C/s.

Como a análise do limite de resistência à tração não seria uma análise possível de avaliar em produtos em linha de produção, e conforme resultado obtido de que a dureza não é uma propriedade confiável para avaliar o desgaste nos insertos de usinagem, fica comprovado então que o controle por meio do processo de resfriamento controlado poderá ser uma alternativa viável no chão de fábrica.

REFERENCES

- [1] SEMIATIN, S.L. ASM Handbook Volume 14A Metalworking: Bulk Forming. 1^a ed. United States of America, 2005. 3p, 37p, 244 – 245p.
- [2] NAHRMANN, M., MATZENMILLER, A. A Critical Review and Assessment of Different Thermoviscoplastic Material Models for Simultaneous Hot/Cold Forging Analysis. International Journal of Material Forming. Alemanha, 2021. 641-662.
- [3] KAUR, J., PABLA, B., DHAMI, S. A Review on Field Areas of Research in Forging Process Using FEA. International Journal of Engineering Research & Technology. India, 2016.

- [4] SARIKAYA, M., GUPTA, M., TOMAZ, I., PIMENOV, D., KUNTOGLU, M., KHANNA, N., YILDIRIM, Ç., KROLCZYK, G. A State-of-art Review on Tool Wear and Surface Integrity Characteristics in Machining of Superalloys. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. Turquia, 2021. 624-658.
- [5] GALIBOIS, A., KRISHNADEV, M., DUBÉ, A. Control of Grain Size and Sub-Structure in Plain Carbon and high Strength Low Alloy (HSLA) Steels – the Problem and the Prospect. Metallurgical Transactions. Canada, 1979.
- [6] EBRAHIMI, A., MOSHKARSAR, M. Evaluation of machinability in turning of microalloyed and quenched-tempered steels: Tool Wear, Statistical Analysis, Chip Morphology. Journal of Materials Processing Technology 209. Iran, 2009. 910 – 921.
- [7] American Society for Testing and Materials. ASTM E112-13: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. United States. 2021.
- [8] American Society for Testing and Materials. ASTM E8/E8M: Métodos de Ensaio Normalizados para Teste de Tensão de Materiais Metálicos. Estados Unidos. 2012.



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil
26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG
25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental
Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

Influência da geometria inicial de tarugos em ocorrências de trincas superficiais para forjados redondos em matriz aberta

João Francisco R. da Cunha ⁽¹⁾
Roberto Tiburcio C. Frota Jr. ⁽²⁾
Mahira Adna Cota Araujo ⁽³⁾

RESUMO

No forjamento de barras redondas em matriz aberta, a operação parte de diferentes geometrias de lingote ou tarugos pré conformados, dependentes de diversos fatores como lingoteira e facilidade de empilhamento. Neste trabalho foi estudada a correlação entre a geometria inicial (redonda ou quadrada) de tarugos pré conformados para segunda operação de forjamento e a ocorrência de trincas durante o processo final de forjamento em matriz aberta. Por meio de simulações e mapeamento de defeitos de peças forjadas, concluiu-se que a utilização de geometria de tarugo inicial quadrada com os cantos chanfrados resulta em menor acúmulo de tensões e, conseqüentemente, em uma menor incidência de trincas em comparação com a geometria quadrada com cantos retos. Essa correlação contribui para a otimização do processo de forjamento em matriz aberta, melhorando a qualidade das peças finais e diminuição de refugos.

Palavras-Chaves — Forjamento em Matriz Aberta, Geometria de Tarugos, Trincas Superficiais, Simulação Numérica.

⁽¹⁾ Engenheiro Mecânico, Engenheiro de Processos a Quente, Villares Metals – Sumaré-SP, joao.ruy@villaresmetals.com;

⁽²⁾ Mestre em Engenharia Aeronáutica e Mecânica, Pesquisador, Villares Metals – Sumaré-SP, roberto.frota@villaresmentals.com;

⁽³⁾ Doutora em Engenharia Metalúrgica, Engenheira de Produto, Villares Metals – Sumaré-SP, mahira.araujo@villaresmetals.com

Influence of initial billet geometry on occurrences of surface cracks for round forgings in an open die

ABSTRACT

In open die forging, the process begins with different billet or preformed billet geometries, dependent on various factors such as mold design and ease of stacking. This study investigated the correlation between the initial geometry (round or square) of preformed billets for the second forging operation and the occurrence of cracks during the final open die forging process. Through simulations and defect mapping of forged parts, it was concluded that the use of initial square billet geometry with beveled corners results in lower stress accumulation and, consequently, a lower incidence of cracks compared to square geometry with straight corners. This correlation contributes to the optimization of the forging process, enhancing the quality of the final pieces and reducing waste.

Keywords — Open Die Forging, Billet Geometry, Surface Cracks, Numerical Simulation.

1. INTRODUÇÃO

O processo de forjamento em matriz aberta é amplamente utilizado na indústria metalúrgica para a conformação de peças metálicas de médio e grande porte. Durante esse processo, o forjamento de cantos de tarugos representa um desafio crítico que pode resultar em defeitos superficiais, comprometendo a qualidade e a integridade das peças forjadas.

Durante o planejamento de um processo de forjamento há várias variáveis que são significativas em um processo de deformação [1] como material do tarugo, ferramental, condições na interface ferramenta-peça, zona de deformação, equipamento usado, produto e ambiente, sendo que a escolha adequada do tipo de tarugo intermediário e a geometria associada podem desempenhar um papel fundamental na determinação da qualidade do produto. Este trabalho aborda a influência da geometria de tarugos intermediários nas tensões envolvidas durante o processo de forjamento, com foco especial no forjamento de cantos com matrizes abertas em “V”, para forjamento final de peças com seções redondas.

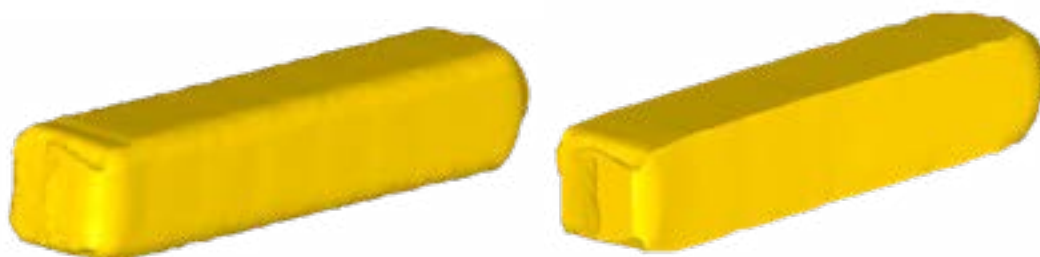


Figura 1: Exemplo de diferentes geometrias de tarugo intermediário durante a produção de produto forjado. À esquerda tarugo com o canto chanfrado e à direita tarugo com canto vivo.

A geometria do tarugo intermediário, conforme ilustrado na Figura 1, incluindo a forma e as dimensões, também desempenha um papel crucial nas tensões geradas durante o forjamento. Estudos sobre geometrias de tarugos e lingotes [2] têm demonstrado que geometrias podem influenciar nos mecanismos de fechamento de vazios internos bem como aumentar o esforço da prensa durante o processo de forjamento, em que tarugos ou lingotes de seções quadradas tem maior esforço da prensa para conformação frente a redondos e oitavados, o que pode gerar tensões excessivas na superfície e contribuir para rompimentos somado a concentração de tensão de cantos em 90 graus.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo da influência da geometria do tarugo intermediário foi realizado por meio de simulação numérica por elementos finitos utilizando o software DEFORMTM3D. O objeto deformável (lingote/tarugo) foi definido no modelo plástico onde as deformações elásticas são ignoradas, pois as deformações plásticas são totalmente predominantes. As matrizes são consideradas rígidas para simplificação do modelo e maior eficiência na obtenção de resultados. Como o processo ocorre em alta temperatura, a simulação térmica acoplada aos cálculos de deformação, considerou transferência de calor com o ambiente e entre objetos.

O material do lingote foi o aço AISI 1050, correspondente ao aço VT50MFO do portfólio da Villares Metals, cuja composição química nominal é apresentada na **Tabela 1**.

Tabela 1: Composição Química do aço AISI 1050 (%massa)

C	Mn	Cr	Si
0,50	0,80	0,20	0,25

As propriedades térmicas e plásticas utilizadas na simulação foram calculadas pelo software JMatPro[®] baseadas na composição química. Para o material das matrizes foi considerado o aço AISI H13 com os parâmetros da biblioteca de materiais do DEFORMTM3D.

A **Figura 2** apresenta as principais dimensões do lingote que foi utilizado na simulação e corresponde a geometria real do lingote, sendo sua seção transversal quadrada com os cantos arredondados.

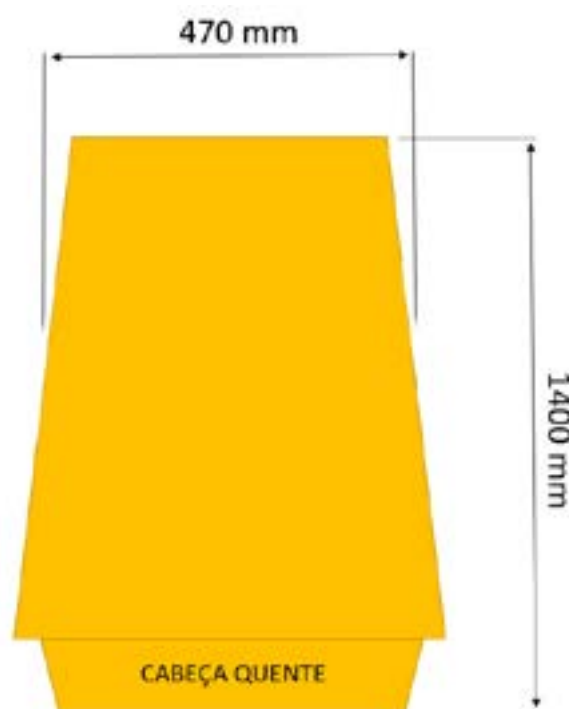


Figura 2: Geometria esquemática em duas dimensões e principais dimensões do lingote 1,95t.

A temperatura inicial do lingote em cada calor de forjamento foi de 1260°C e para as matrizes 200°C, sendo considerado a temperatura ambiente de 30°C, coeficiente de convecção de 20W/m²K e emissividade de 0,7. Como o processo de forjamento real é realizado sem lubrificação foi definido um coeficiente de atrito cisalhante de 0,7.

Visando o objetivo do estudo foram realizadas simulações de 2 estratégias de forjamento diferentes. A **Tabela 2** mostra as etapas consideradas para cada simulação.

Tabela 2: Etapas planejadas para o forjamento

Simulação 1	Simulação 2
1º Calor	1º Calor
Desbaste de Tarugo Quadrado	Desbaste de Tarugo Quadrado chanfrado
2º Calor	2º Calor
Forjamento da Peça	Forjamento da Peça

Os tarugos são materiais que partiram do lingote e já estão conformados, mas não sofreram a deformação final, sendo que quando há mais de um calor (Etapa de volta do material ao forno para reaquecimento), há uma geometria de tarugo para cada calor até o calor final, no qual conforma-se até as dimensões finais especificadas. No caso deste trabalho são dois calores, conseqüentemente com uma etapa de tarugo intermediário, conforme **Tabela 2**.

A simulação foi realizada considerando uma matriz aberta com geometria em “V”, em todo processo, do tarugo até o forjamento final, em ambos os cenários simulados.

Para analisar os resultados foram realizadas comparações de dano acumulado na peça forjada final entre o caso simulado de tarugo intermediário quadrado e com os cantos chanfrados, de forma a avaliar a diferença de criticidade de surgimento de trinca e qual a região da peça com maior probabilidade de ocorrência de defeitos.

A possibilidade de geração de trincas superficiais, chamada de dano, foi avaliada pelo parâmetro de avaliação de fratura dúctil de Cockcroft e Latham (valor C) [3]. O valor C é determinado por

$$C = \int_0^{\varepsilon_f} \left(\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{eq}} \right) d\varepsilon \quad (1)$$

Onde σ_{max} é a Tensão Máxima Principal, σ_{eq} é a Tensão Equivalente e ε_f é a Deformação Equivalente.

Além disso, para validação da simulação, foi realizado um levantamento estatístico de regiões da peça onde se encontram as trincas nos casos reais de peças produzidas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O primeiro resultado a ser analisado foi a geometria final peça, não havendo diferenças significativa entre o forjamento a partir de um tarugo quadrado e quadrado chanfrado, bem como a não indicação de dobras de forjamento.

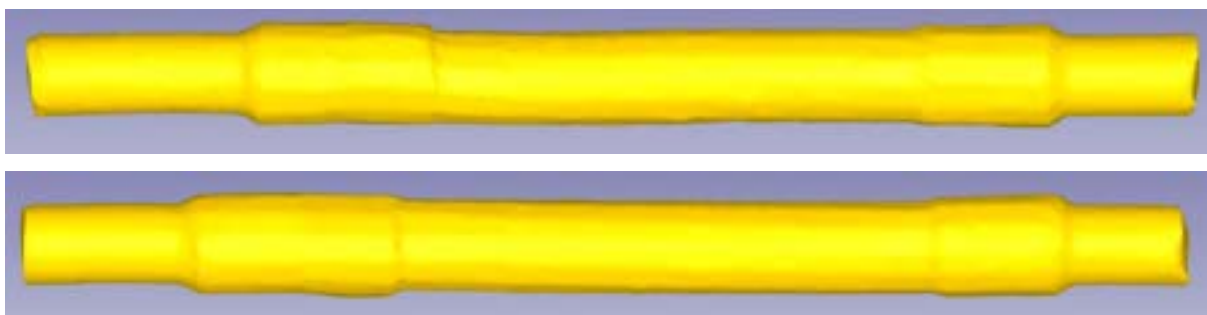


Figura 3: Resultado da geometria de peças forjadas nas Simulações 1 e 2 respectivamente.

Quanto a análise de dano, observa que há uma região com maior dano em uma das pontas conforme **Figura 4**. Este dano foi desconsiderado por ser um dano acumulado de corte em faca na prensa, após o forjamento do tarugo intermediário, sendo assim um dano conhecido e descartado do material útil no processo real.

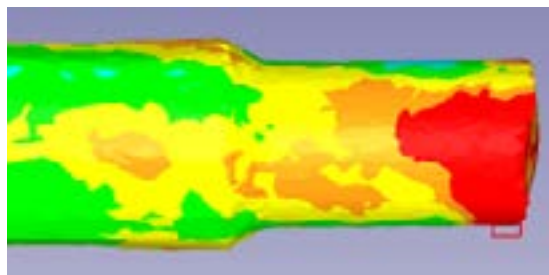


Figura 4: Detalhe do dano em região da extremidade onde foi realizado um corte.

Também há outra parte crítica mais ao centro do eixo (Figura 5), que no caso da Simulação 1, é mais proeminente e que também foi desconsiderado, pois trata-se do posicionamento da bigorna, com avanço total, ao começar o desbaste de metade do tarugo após outra metade já desbastada, sendo caracterizada pela configuração da simulação e o fenômeno como descrito por Arikawa *et al* (2014) [4], sendo que na realidade não deva acontecer devido os avanços de meia bigorna durante os respectivos passes.

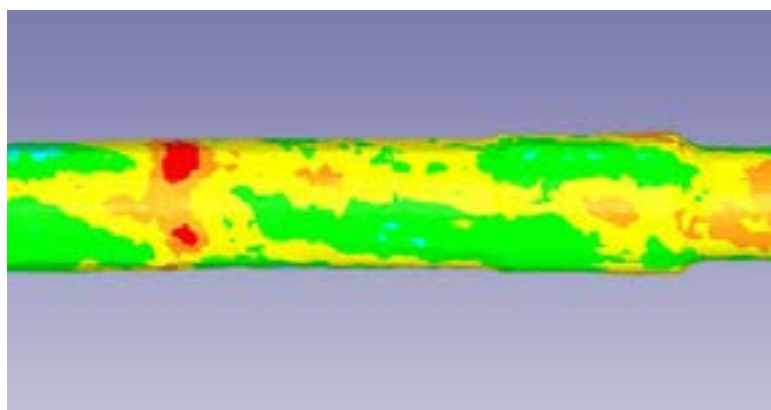


Figura 5: Região no meio do produto forjado com dano elevado.

Descartando-se da avaliação as regiões apresentadas nas Figuras 4 e 5, nas **Figuras 6 e 7** são apresentadas respectivamente as simulações considerando tarugo intermediário com canto vivo e com canto chanfrado. Observa-se destas figuras que do lado direito da peça em ambas as simulações, há um maior dano acumulado. Estas regiões são as que sofreram as últimas deformações e consequentemente apresentam temperatura superficial menor, o que justifica o maior dano acumulado. A tendência de uma maior probabilidade de trincas superficiais do lado direito destas peças foi validada pela estatística de casos de trinca por seção da peça.

Nota-se também que há uma diferença de dano entre a Simulação 1 e 2 (**Figuras 6 e 7**), sendo que a Simulação 2, em que se parte de um tarugo intermediário quadrado com cantos chanfrados apresentou menor dano superficial final, até mesmo para as regiões de dano desconsideradas na análise, o que indica que com as deformações partindo sem o canto vivo há um menor acúmulo de tensões superficiais.

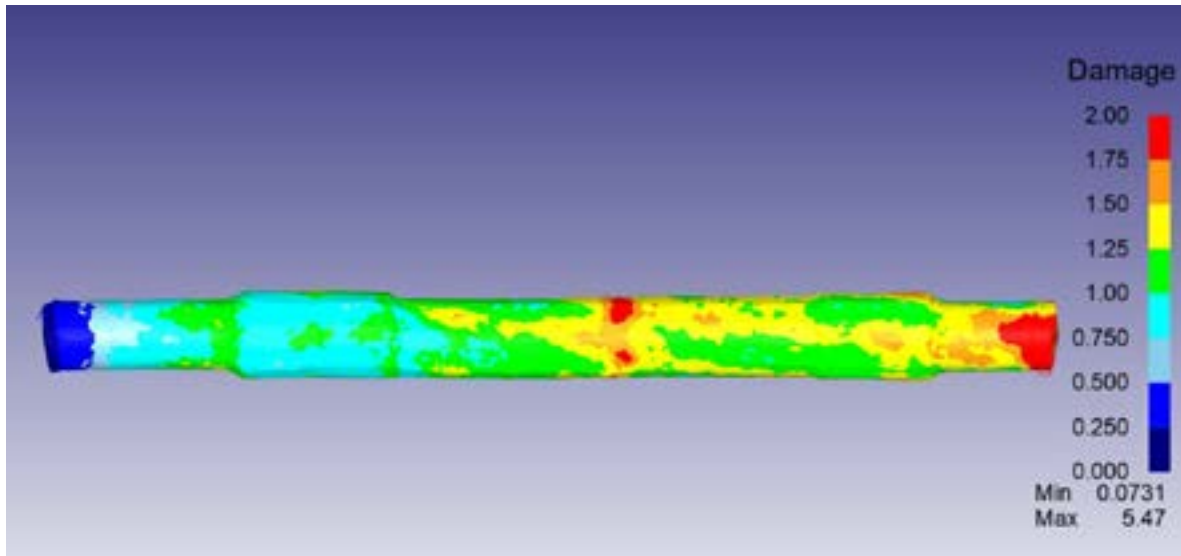


Figura 6: Dano final do forjado final da Simulação 1 com tarugo intermediário quadrado e canto vivo.

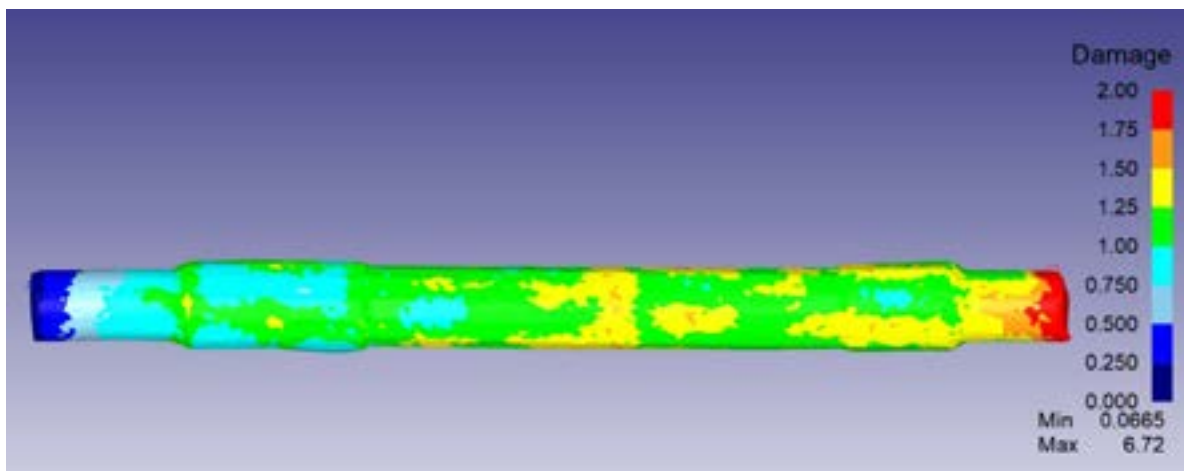


Figura 7: Dano final do forjado final da Simulação 2 com tarugo intermediário quadrado e canto chanfrado.

Ambas as simulações indicam geratrizes no qual há maior dano comparativamente a outras, sendo que ao verificar retroativamente a origem do ponto de maior dano em uma destas geratrizes, encontra-se exatamente o canto do tarugo quadrado como origem, como pode-se observar na **Figura 8**.

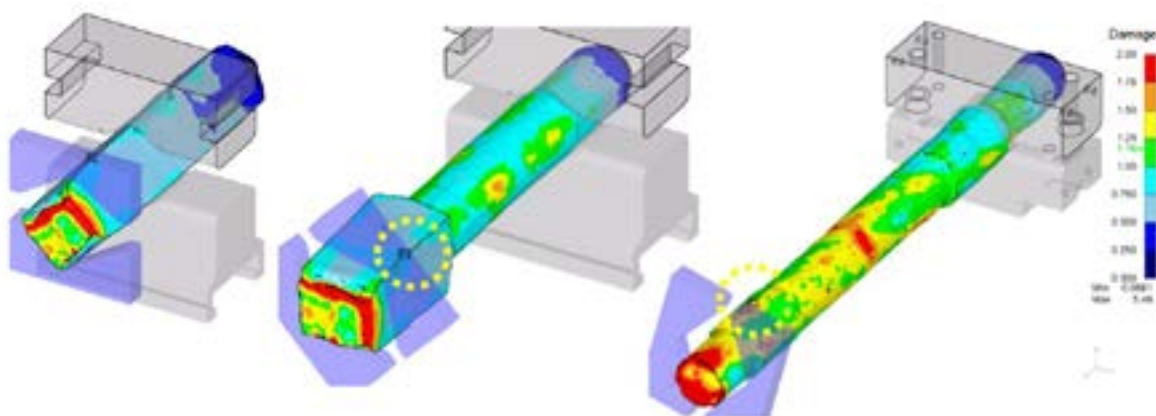


Figura 8: Rastreabilidade de ponto crítico de dano na peça final em relação ao intermediário.

Quando observado casos reais, todos os casos de trincas ocorrem na direção longitudinal, Figura 9, aderente as geratrizes indicadas pela simulação.



Figura 9: Exemplo esquemático de defeito típico da peça em questão.

4. CONCLUSÃO

Com os resultados destas simulações bem como mapeamento de peças produzidas com defeitos superficiais, foi confirmado a tendência de dano maior no forjamento final das peças para a região que sofre deformações significativas por último, em temperaturas mais baixas.

Como a plasticidade do VT50MFO é alta frente a outros aços, bem como uma estabilidade de plasticidade em temperaturas mais baixas, o trabalho indica como possível causa contribuinte de defeitos superficiais longitudinais na peça a deformação de canto reto que pode gerar elevada concentração de tensão e conseqüente dano que se acumula nas 4 geratrizes correspondentes a cada canto do tarugo.

Junto a isso, o uso de cantos chanfrados no tarugo intermediário demonstrou melhora de dano no forjamento da peça comparativamente ao tarugo quadrado, indicando que possa existir uma correlação entre o ângulo do polígono transversal a ser deformado e o acúmulo de dano em peças forjadas em matriz aberta, cujo forjamento da peça parte do uso de matrizes aberta em “V” para peças de perfis redondos.

AGRADECIMENTOS

À Villares Metals pelo apoio a este trabalho.

Referências

- [1] Altan T., Oh S., Gegel H., 1999. Conformação de Metais: Fundamentos e aplicações.
- [2] Dutra S., Im Y. 1990. Investigation of metal flow in open-die forging with different die and billet geometries. Journal of Materials Processing Technology, 21, 143-154.
- [3] Cockcroft, M. G., Latham, D. J., 1968. Inst. Met., 96, 33-39.
- [4] Arikawa, T., Yamabe, D., & Kakimoto, H., 2014. Influence of anvil shape of surface crack generation in large hot forging process. Procedia Engineering, 81, 480-485.



42nd S E N A F O R
26th International Forging Conference
25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming
Conference / 9th BrDDRG Congress
12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS
October 4-6, 2023

A Evolução do Tamanho de Grão e o Resfriamento Controlado com foco na Resistência Mecânica Final do Forjado – uma Primeira Análise

Grain Size Evolution and Controlled Cooling focused on the Forged Part Mechanical Resistance – a First Analysis

Guilherme O. Goulart ⁽¹⁾
João V. do Carmo ⁽²⁾
Luiz L. T. Vaughan ⁽³⁾
José A. G. de Souza ⁽⁴⁾
Alisson S. Duarte ⁽⁵⁾

RESUMO

A evolução do tamanho de grão no forjamento a quente e as fases formadas possuem influência nas propriedades mecânicas finais do forjado. Essas propriedades mecânicas afetam não somente a aplicação do componente, mas também as operações subsequentes ao forjamento, como a usinagem por exemplo. Foram realizados forjamentos a quente para uma mesma peça em aço microligado, variando-se a taxa de resfriamento pós-forjamento. O tamanho de grão foi medido na prática e também previsto na simulação do forjamento a quente através do software QForm UK. Além disso, foram obtidas as resistências mecânicas finais considerando diferentes condições de resfriamento, bem como simuladas essas condições. Logo, foi possível realizar uma primeira análise numérica acerca dos fenômenos ocorridos em prática, estabelecendo um ponto de partida para a elaboração de uma metodologia mais completa.

⁽¹⁾ M. Sc.; Pontifícia Universidade Católica, PUCRS, guilherme.oliveira91@edu.pucrs.br

⁽²⁾ Graduando; Instituto de Engenharias Integradas, UNIFEI, jvcarmo1920@gmail.com

⁽³⁾ Professor; Instituto de Engenharias Integradas, UNIFEI, lvaughan@unifei.edu.br

⁽⁴⁾ Professor; Dep. de Engenharia Mecânica, UTFPR, josesousa@utfpr.edu.br

⁽⁵⁾ Professor; Escola de Engenharia, UFMG, alisson@sixpro.pro

Palavras chave — Forjamento a Quente, Aço Microligado, Tamanho de Grão, Resfriamento Controlado, Simulação, Elementos Finitos.

Abstract

Grain size evolution in hot forging and its final phases have influence on the material properties. Those properties variations modify the subsequent processes efficiency, such as machining, and also the final part efficiency. Experimental hot forging has been conducted for a microalloyed steel, including a cooling rate variation after forging. Measured and simulated grain size have been analyzed, as well as final mechanical resistance considering different colling rates. Therefore, a first simulation analysis was conducted, which was important to making possible the definition of a more complete methodology.

1. Introdução

O tamanho do grão tem um impacto significativo nas propriedades mecânicas dos materiais, especialmente em materiais forjados. O forjamento pode alterar a estrutura de grão do material, uma vez que sujeita o material a variações de temperatura e deformações plásticas, podendo alterar o tamanho e a morfologia dos grãos. Assim, o forjamento é frequentemente usado não apenas para dar forma aos materiais, mas também para melhorar suas propriedades mecânicas através do controle da microestrutura.

A velocidade de resfriamento pode influenciar significativamente o tamanho de grão, especialmente dependendo da temperatura à qual o material atinge em forno ou após o forjamento. Um resfriamento rápido (como a têmpera em água ou óleo) geralmente resulta na formação de grãos muito pequenos. Isso ocorre porque, à medida que o metal começa a solidificar ou passar por transformações de fase, há pouco tempo para os grãos crescerem antes que a transformação se complete. Já um resfriamento mais lento permite que os grãos cresçam em tamanho à medida que o material se solidifica ou passa por transformações de fase. Grãos maiores geralmente se formam porque há mais tempo para a migração de átomos e crescimento de grão durante a transformação. Em muitos aços, um resfriamento lento resultará em uma microestrutura de ferrita e perlita, que é mais macia e dúctil em comparação com a martensita.

Em aços microligado, elementos como nióbio, vanádio e titânio podem formar carbonetos e nitretos muito finos, que retardam o movimento das discordâncias e, portanto, a recristalização, favorecendo uma microestrutura refinada. Esses elementos também contribuem para o fortalecimento por precipitação. Durante o resfriamento ou processos térmicos subsequentes, esses elementos podem precipitar, impedindo o movimento das discordâncias e, portanto, aumentando a resistência mecânica do aço.

Logo, o presente trabalho se propôs a realizar uma primeira análise acerca do forjamento a quente do aço microligado DIN 38MnVS6, buscando estabelecer uma relação inicial entre tamanho médio de grão, condições de resfriamento e resistência mecânica final. Foram realizados procedimentos experimentais e simulações numérica usando o QForm UK (Micas Simulation Ltd., Oxford, UK). Ainda que se disponha de quantidades limitadas de dados, esta primeira investigação consegue estabelecer uma compreensão inicial, criando uma base de entendimento para a definição de novas ações e ensaios de materiais que visem complementar a análise das propriedades mecânicas finais e as suas influências.

2. Análise experimental

Antes de se iniciar o forjamento, foi realizado um experimento para se obter as curvas de resfriamento. Partindo de tarugo em aço microligado DIN 38MnVS6 (Tabela 1), com 36,5 mm de diâmetro e 160,0 mm de altura. Assim, foi inserido um termopar através de um furo com terminação no centro do tarugo,

como pode ser observado na Figura 1 (a). Além disso, foi realizada uma metalografia do material recebido, mostrada na Figura 1 (b), na qual mediu-se um tamanho de grão de 32 μm .

Tabela 1 – Composição química do aço microligado DIN 38MnVS6 como fornecido.

Elemento (% em massa)	Especificado		Medido
	Mín.	Máx.	
C	0,34	0,41	0,384
Si	0,15	0,8	0,560
Mn	1,2	1,6	1,390
P	-	0,025	0,007
S	0,02	0,06	0,023
V	0,08	0,2	0,099
Cr	-	0,3	0,167

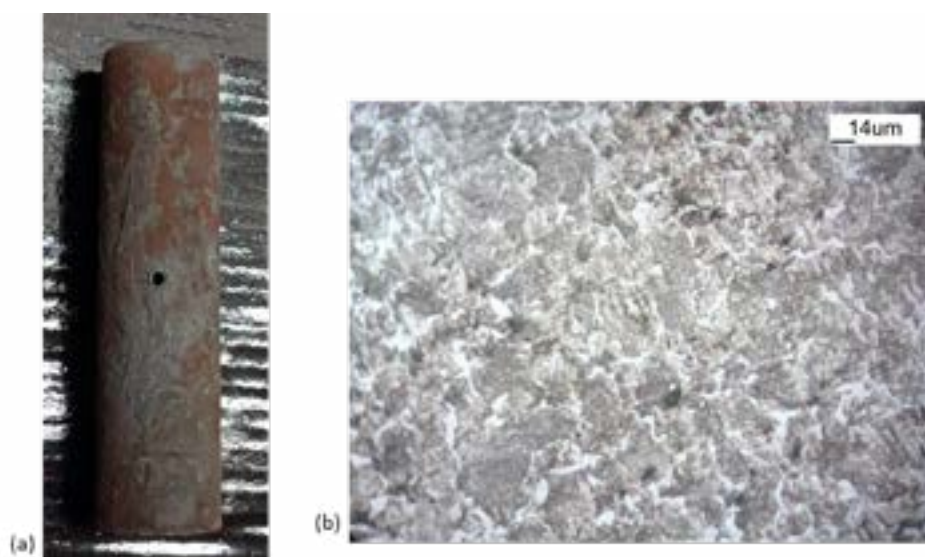


Figura 1 – (a) Tarugo inicial com furo para medição de temperatura e (b) sua metalografia na condição fornecida.

Com o uso ar comprimido, realizou-se quatro resfriamentos distintos, sendo um não forçado e os outros três com intensidades características. Assim, considerou-se uma condição na qual o ar não foi forçado (ar parado), outra na qual a velocidade do ar foi lentamente forçada (ar lento), outra forçada moderadamente (ar moderado) e a última forçada de maneira mais acelerada (ar acelerado). Os perfis das curvas de resfriamento podem ser verificados na Figura 2. Embora a temperatura de enxarque tenha sido 1.225 $^{\circ}\text{C}$, as medições se iniciaram em aproximadamente 950 $^{\circ}\text{C}$.

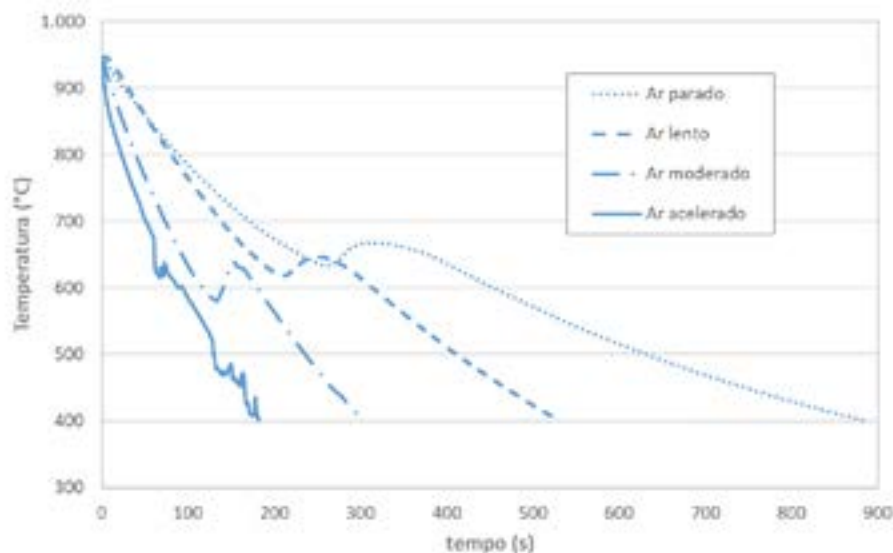


Figura 2 – Curvas de resfriamento do tarugo para diferentes condições de resfriamento ao ar.

Após a obtenção das curvas de resfriamento no tarugo não forjado, realizou-se o processo completo, incluindo o forjamento e mantendo-se a consideração de quatro condições distintas de resfriamento. Depois de aquecer o tarugo a 1.225 °C por 28 min, o tarugo foi transferido para a prensa, exposto ao ar por 8 s e repousado na matriz inferior por 1 s antes da descida da prensa, como pode ser visualizado na Figura 3. A prensa hidráulica com velocidade de 7,5 mm/s se deslocou por 135,1 mm até o fechamento das matrizes, dos quais 71,3 mm foram em vazio.



Figura 3 – Posicionamento do tarugo para realização do forjamento.

O resultado do processo prático foi a peça forjada apresentada na Figura 4 (a). Foram obtidas metalografias típicas na região central e a meio raio na seção de corte mostrada na Figura 4 (b). Embora as metalografias sejam bastante similares, mediu-se uma variação do tamanho de grão médio final entre o centro e a região de meio raio para todas as condições de resfriamento. A região central possui um tamanho de grão relativamente menor do que a região a meio raio, conforme estabelecido na Tabela 2. No que diz respeito a uma possível variação do tamanho de grão em função da condição de resfriamento, não foi possível estabelecer uma tendência, sendo considerado que não houve variação. Por outro lado, observou-se uma tendência de aumento do Limite de Resistência à Tração com o aumento da velocidade de resfriamento, como pode ser verificado a partir dos valores presentes na Tabela 3, o que pode sugerir um aumento na quantidade de perlita na microestrutura.



Figura 4 – (a) Peça forjada e (b) sua respectiva micrografia no centro e a meio raio.

Tabela 2 – Tamanho de grão final medido para diferentes condições de resfriamento.

Velocidade do meio de resfriamento ao ar	Tamanho médio do grão (μm)	
	Centro	Meio raio
Parado	131 μm	141 μm
Lento	125 μm	146 μm
Moderado	119 μm	162 μm
Acelerado	127 μm	146 μm

Tabela 3 – Limite de Resistência à Tração medido para diferentes condições de resfriamento.

Resfriamento	Limite de Resistência à Tração (MPa)			
	Ar parado	Ar lento	Ar moderado	Ar acelerado
Amostra (i)	900,55	947,41	958,61	953,75
Amostra (ii)	922,07	940,49	939,16	987,06
Amostra (iii)	887,14	943,14	957,43	984,99
Amostra (iv)	905,71	954,93	929,14	969,52
Amostra (v)	913,67	951,98	991,77	961,56

3. Análise numérica

Com o intuito de aprofundar no entendimento do processo e dos seus resultados no forjado final, realizou-se a simulação de toda a etapa descrita via experimentos. Entretanto, inicialmente era necessário determinar os coeficientes de transferência térmica (HTC) para cada condição de resfriamento testada. Assim, considerou-se um tarugo a 1.225 °C e procedeu-se com uma análise inversa da etapa de resfriamento do tarugo utilizando-se o software QForm UK (Micas Simulation Ltd., Oxford, UK).

O material utilizado na simulação para a obtenção do HTC foi obtido a partir do JMatPro® v13.1 (Sente Software Ltd., UK), considerando a composição química apresentada na Tabela 1, a temperatura de austenitização do tarugo (1.225 °C) e o tamanho de grão medido no material fornecido (32 μm). Assim, obteve-se os valores de 15, 40, 123 e 223 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ para as condições de resfriamento em ar parado,

lento, moderado e acelerado, respectivamente. As comparações entre as curvas medidas na prática e as curvas previstas pela simulação estão apresentadas na Figura 5.

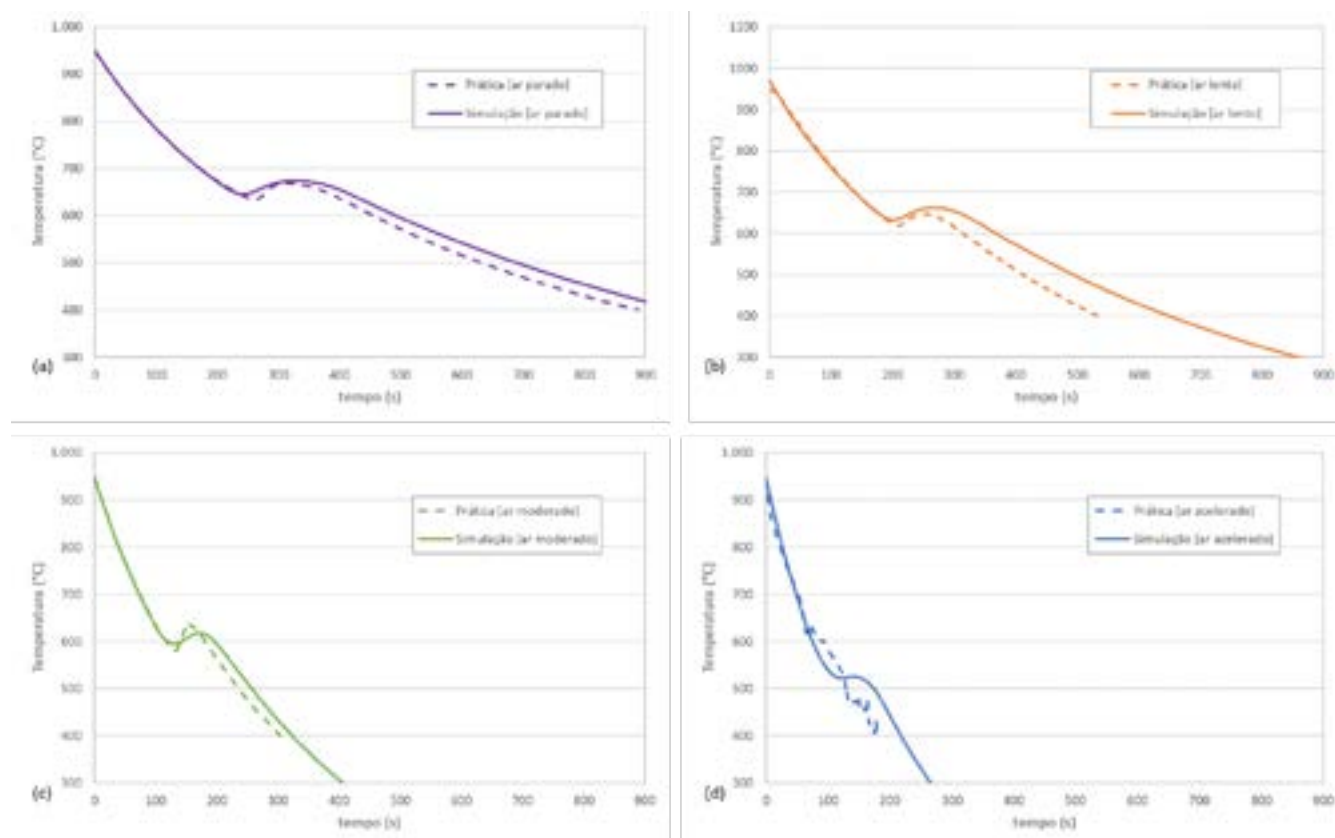


Figura 5 – Comparação numérica e prática das condições de resfriamento do tarugo: (a) ar parado, (b) ar lento, (c) ar moderado e (d) ar acelerado.

Uma vez obtidas as condições necessárias para se realizar a simulação da transferência de calor em cada condição de resfriamento, passou-se para a etapa de simulação do processo completo. O processo completo incluiu as etapas mostradas na árvore de simulação estabelecida no QForm UK (Micas Simulation Ltd., Oxford, UK) apresentada na Figura 6, na qual a última etapa de resfriamento apresenta 4 condições paralelas, como já descrito anteriormente.



Figura 6 – Fluxograma da simulação do processo completo, incluindo o forjamento.

A primeira operação foi o aquecimento em forno. Nessa operação, monitorou-se a temperatura em um ponto no centro do tarugo, a qual se comportou como mostrado na Figura 7. Após a transferência para a prensa, a temperatura na peça evolui durante a operação de forjamento conforme exibido na Figura 8. Além da temperatura, é possível observar também as regiões de intensa deformação plástica e velocidade de deformação na Figura 9. Todas essas variáveis analisadas até o momento são determinantes no processo de recristalização.

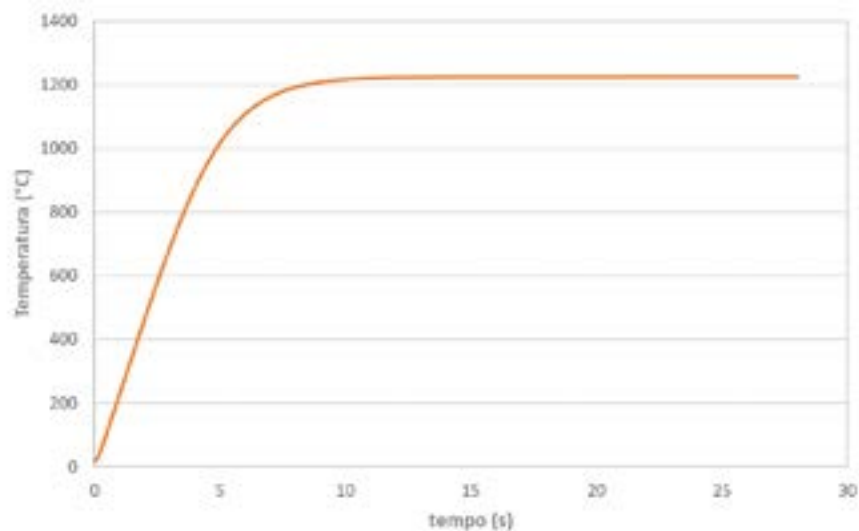


Figura 7 – Simulação da temperatura de aquecimento no centro do tarugo.

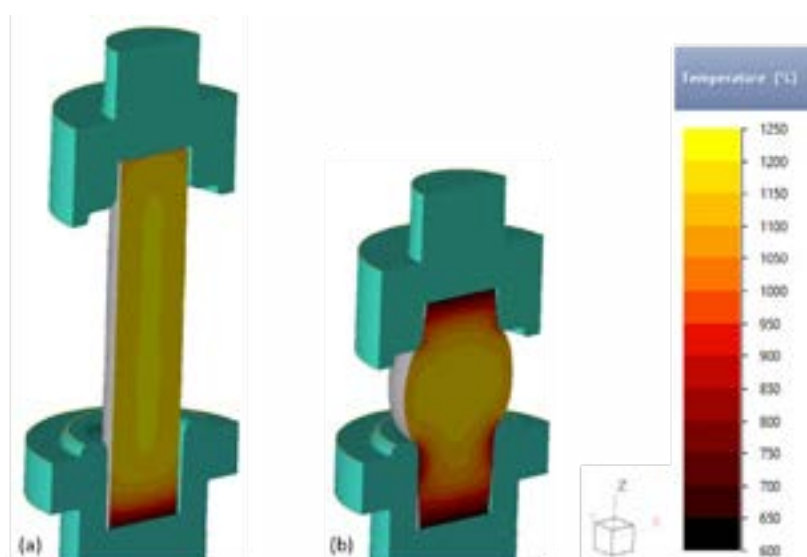


Figura 8 – Simulação da distribuição da temperatura na peça (a) no início e (b) no final do forjamento.

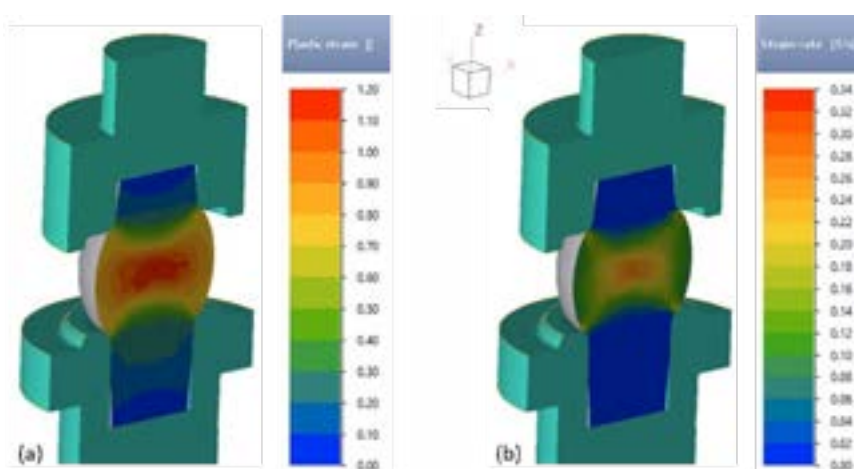


Figura 9 – Simulação da distribuição da (a) deformação plástica e (b) velocidade de deformação.

A previsão da evolução do tamanho de grão demanda uma considerável quantidade de variáveis do material. Dispondo somente das medições do tamanho de grão no tarugo fornecido, no tamanho de

grão final para cada condição de resfriamento e dos parâmetros de processo, assumiu-se coeficientes do material referentes à recristalização dinâmica e ao crescimento de grão que permitissem a obtenção de valores próximos aos medidos. Inclusive, considerou-se que o tamanho de grão medido seria referente ao tamanho de grão austenítico ao final do forjamento, o supõe-se não ser realístico. Ainda assim, considera-se aceitável essa metodologia para esta primeira investigação acerca do fenômeno em estudo. A previsão do tamanho de grão após o forjamento pode ser verificada na Figura 10, bem como a variação do tamanho de grão médio ao longo do raio da peça pode ser analisada na Figura 11 em comparação com os valores medidos na prática.

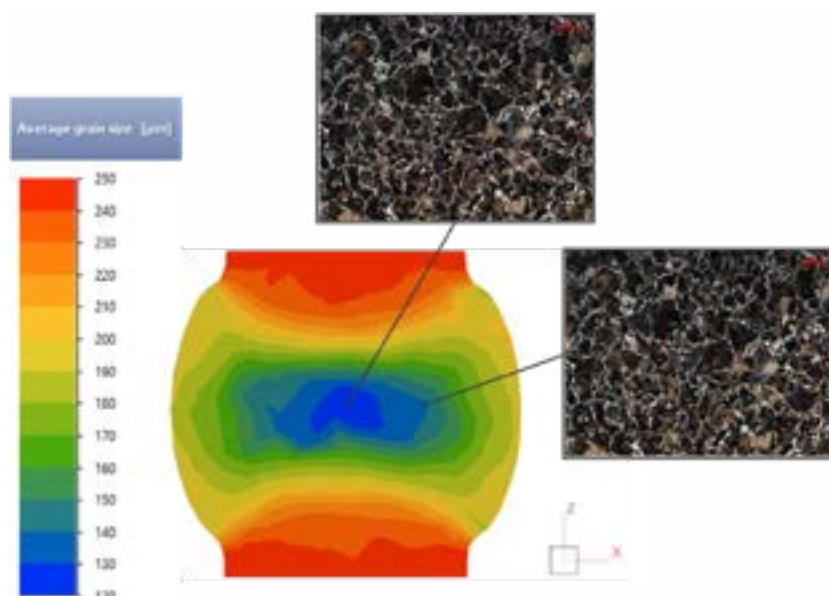


Figura 10 – Previsão do tamanho de grão médio após o forjamento.

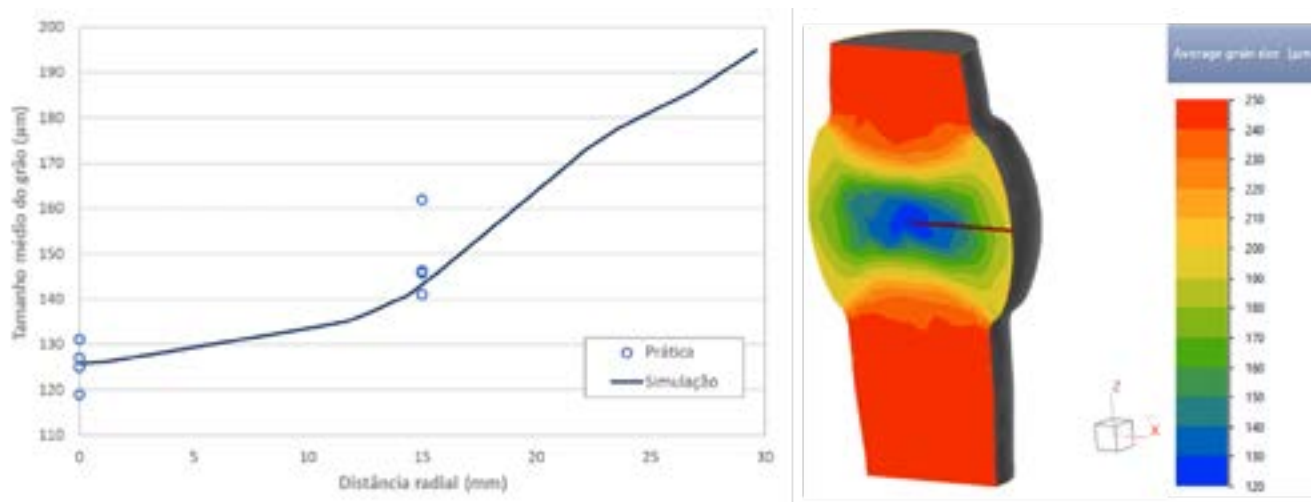


Figura 11 – Previsão da variação do tamanho de grão médio ao longo do raio da peça em comparação com medições feitas em prática.

Uma vez previsto um tamanho de grão médio de 126 µm no centro da peça ao final do forjamento, bem como uma temperatura próxima a 1.200 °C, calculou-se um material via JMatPro® v13.1 considerando essas informações. Assim, procedeu-se com o cálculo do resfriamento para as quatro condições distintas, considerando os coeficientes de transferência térmica já obtidos. As curvas de resfriamento a partir do forjado estão plotadas no diagrama de transformação por resfriamento contínuo na Figura 12.

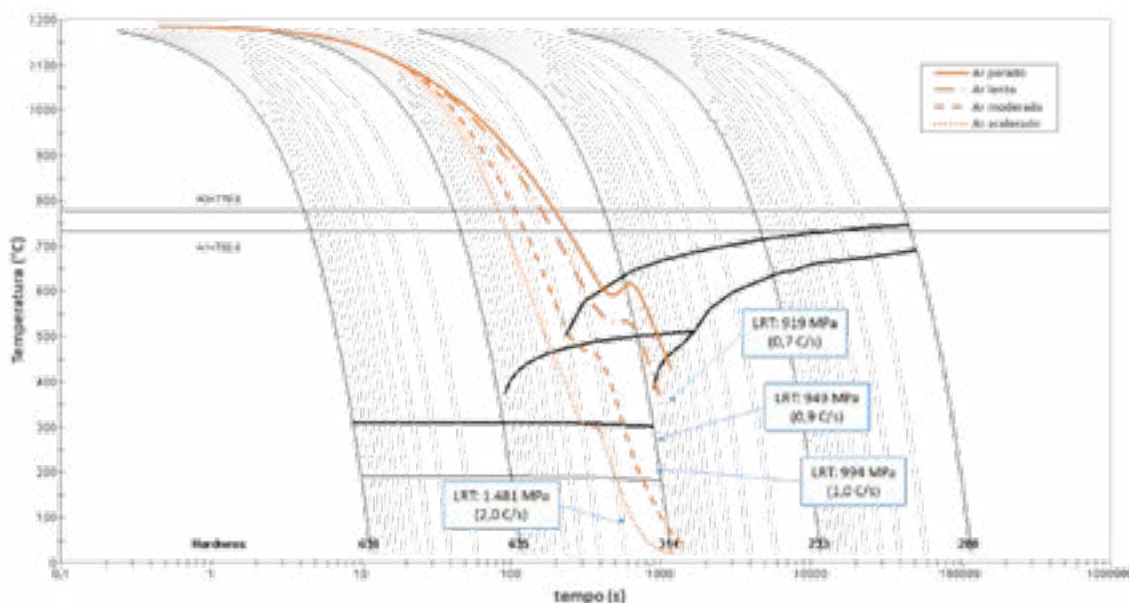


Figura 12 – Diagrama de transformação por resfriamento contínuo (TRC/CCT) do aço DIN 38MnSV6, com 126 μm partindo de 1.200 $^{\circ}\text{C}$, incluindo as curvas de resfriamento para diferentes condições após o forjamento.

É possível observar a partir da Figura 12 que, para os resfriamentos em ar parado e lento, os Limites de Resistência à Tração estão mais condizentes com a prática. Entretanto, para os resfriamentos mais rápidos os valores estão diferentes. Inclusive, observa-se que para esses resfriamentos maiores, há possíveis formação de bainita e até de martensita, o que não foi observado em prática. Isso sugere que os dados de entrada para a simulação do material no JMatPro® podem não estar realistas, devendo haver uma maior investigação acerca do tamanho de grão austenítico na prática.

Comparativamente, plotou-se na Figura 13 os diagramas de transformação por resfriamento contínuo para as condições de 32 e 126 μm , partindo de 1.200 $^{\circ}\text{C}$. Observa-se que o aumento do tamanho de grão possui sensível influência no deslocamento das curvas de transformação para a direita, propiciando a formação de fases mais duras. Com isso, ao contrário do material com 126 μm , um material partindo de um grão austenítico de 32 μm apresenta uma melhor concordância com a resistência mecânica medida em prática para as condições de resfriamentos mais rápidos, ficando em desacordo para as condições mais lentas. Logo, sugere-se haver a necessidade de maior investigação acerca do material para que seja calculado um diagrama mais preciso para este caso.

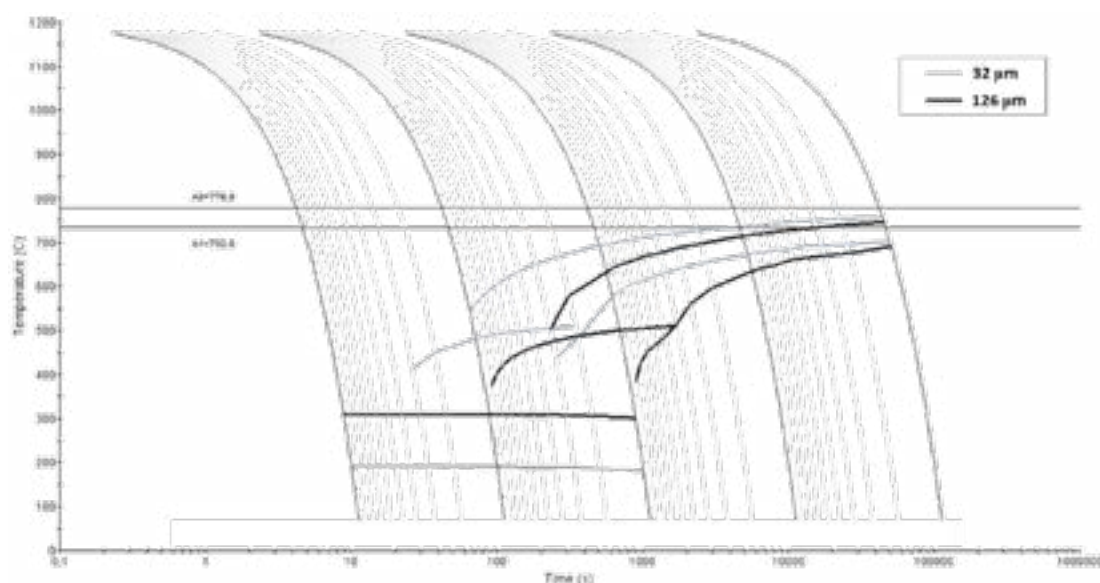


Figura 13 – Diagrama de transformação por resfriamento contínuo (TRC/CCT) incluindo as curvas de transformação para duas condições de tamanho de grão, 32 e 126 μm , partindo de 1.200 $^{\circ}\text{C}$.

4. Conclusões

Foi possível estabelecer uma primeira linha de investigação acerca da influência combinada da evolução do tamanho de grão durante o processo de forjamento e das condições de resfriamento ao ar natural e forçado com intensidade variável. Assim, utilizando-se de dados experimentais e de simulação por elementos finitos, foram analisadas características importantes, tanto do material quanto do processo, que são determinantes para a resistência mecânica final do material da peça forjada.

Com base em algumas metalografias obtidas no material do forjado final, buscou-se prever numericamente a condição de tamanho de grão a partir da definição de coeficientes arbitrários para as equações de recristalização e crescimento de grão. Embora esta primeira análise tenha sido de especial importância para o desenvolvimento, faz-se necessário estabelecer novos procedimentos experimentais para a obtenção de dados do material.

No tocante ao resfriamento controlado, é necessário buscar uma maior compreensão do comportamento do material sob condições de resfriamento contínuo, especialmente relativo à característica de microligado com efeito nas formações de fases e suas propriedades mecânicas à temperatura ambiente.



42nd S E N A F O R
26th International Forging Conference
25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming
Conference / 9th BrDDRG Congress
12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS
October 4-6, 2023

Impressão 3D de Pré-Formas Forjadas a partir da Simulação por Elementos Finitos

Forging Preform 3D Print from FE Simulation Results

Felipe S. Oliveira ⁽¹⁾
Nicholas Beggs ⁽¹⁾
Alisson S. Duarte ⁽²⁾

RESUMO

No forjamento a quente com o uso de pré-formas obtidas por martelamento com manipulação manual, as definições da geometria da pré-forma e do procedimento de manipulação e golpes na peça se tornam decisivas para a obtenção de peças sem defeitos de forja. Com o uso da simulação computacional via QForm UK, foi possível otimizar os procedimentos e as pré-formas obtidas para a realização de um forjamento completo e eficiente. Além disso, as simulações têm sido utilizadas como ferramentas de orientação e instrução para a equipe de produção, estabelecendo a evolução da geometria durante cada golpe aplicado na operação de obtenção da pré-forma. Mais do que isso, a partir da simulação foi possível materializar pré-formas através da impressão 3D para a criação de padrões a serem considerados na linha de produção pelos profissionais de operação.

Palavras-chave — Forjamento, Martelo, Martetele, Pré-forma, Impressão 3D, Simulação, Elementos finitos.

Abstract

Preforms procedures by hammer hot forging processes, considering manual manipulation, have a great influence on the final forged part quality. By using FE simulation via QForm UK, preforms shapes and its procedures have been optimized. Also, simulations have been used for creating standard procedures and detailed instructions to the operational professionals, describing the workpiece evolution at each blow. In special, 3D printings have been conducted based on the simulated preform, creating a real object as a standard model for professional to achieve as a hammer forged preform.

Key words —Forging, Hammer, Preform, 3D Print, Simulation, Finite Element.

⁽¹⁾ Dept. Engenharia; Arco Forjado, Brasil, engenharia5@arcoforjado.com.br

⁽²⁾ Eng. de Simulação; SIXPRO Virtual&Practical Process, Brasil, contato@sixpro.pro

1. Introdução

O processo de forjamento geralmente envolve várias etapas, começando pela obtenção do material em bruto e, em seguida, dando-lhe uma forma básica ou pré-forma que se assemelha aproximadamente à forma final desejada. A pré-forma facilita o processo subsequente, ajudando a reduzir a quantidade de deformação necessária na etapa final de forjamento, melhorando assim a eficiência do processo e a qualidade da peça final.

A fabricação de uma pré-forma pode envolver diversos tipos de equipamentos, dependendo do material em questão e do processo de forjamento utilizado. Prensas, martelos e laminadores são exemplos de equipamentos utilizados na conformação de pré-formas de forjamento, sendo a seleção do equipamento adequado dependente do tipo de metal ou liga que está sendo forjado, do tamanho e forma da pré-forma e das especificações do produto final. Além desses pré-requisitos, a escolha do equipamento também reflete as práticas de forjamento estabelecidas em uma forjaria, considerando a experiência de seus profissionais e os custos envolvidos tanto na aquisição de um equipamento, quanto no próprio custo de fabricação.

O presente trabalho é baseado em uma linha de produção na qual as pré-formas são comumente conformadas através do uso de martelos, ou marteletes. Neste caso, o profissional da operação recebe o tarugo aquecido e o manipula manualmente durante o martelamento. Em geral, o profissional opera a peça de trabalho e a manipula com deslocamentos longitudinais e movimentos de rotação em torno do próprio eixo do tarugo. Três golpes típicos durante uma conformação de pré-forma podem ser visualizados na Figura 1, na qual o tarugo é (a) golpeado antes de ser deslocado em direção ao operador, (b) depois ele é novamente golpeado, devendo posteriormente ser rotacionado e deslocado mais uma vez em direção ao operador e, finalmente, (c) sofre mais um golpe de martelamento.



Figura 1 – Sequência do forjamento de uma pré-forma usando martelete.

Tipicamente, a elaboração de um processo de forjamento considerando a obtenção de uma pré-forma por meio de um martelete passa pela definição do que seria uma geometria ideal para a pré-forma. Então, é realizado um tryout visando com que o operador tente obter aquela pré-forma com base na sua experiência. Esse processo é dispendioso, demandando tempo e diversas tentativas. Além disso, operadores distintos possuem práticas distintas para a obtenção de uma determinada pré-forma, havendo falta de repetibilidade e controle do processo.

Objetivando uma maior eficiência durante o tryout e também padronizar a operação de conformação da pré-forma em martelete, este artigo propõe uma metodologia baseada na simulação pelo Método dos Elementos Finitos, usando o software QForm UK (Micas Simulation Ltd., Oxford, UK), e na impressão 3D das pré-formas simuladas. As peças impressas em material polimérico são, então, definidas como um modelo físico padrão para os operadores, bem como a manipulação do tarugo durante o martelamento é padronizado.

2. Concha-Garfo (caso 1)

O primeiro caso abordado foi o forjamento da peça Concha-Garfo. A elaboração do processo considerou um forjamento em prensa de parafuso em dois golpes com cavidades distintas, no qual o primeiro golpe partiria de uma pré-forma relativa a Figura 2 (o). Esta pré-forma seria obtida através da conformação em martelete, para a qual o plano de golpes foi elaborado via simulação computacional através do software QForm UK, definida pelos 15 golpes mostrados na Figura 2 de maneira detalhada.

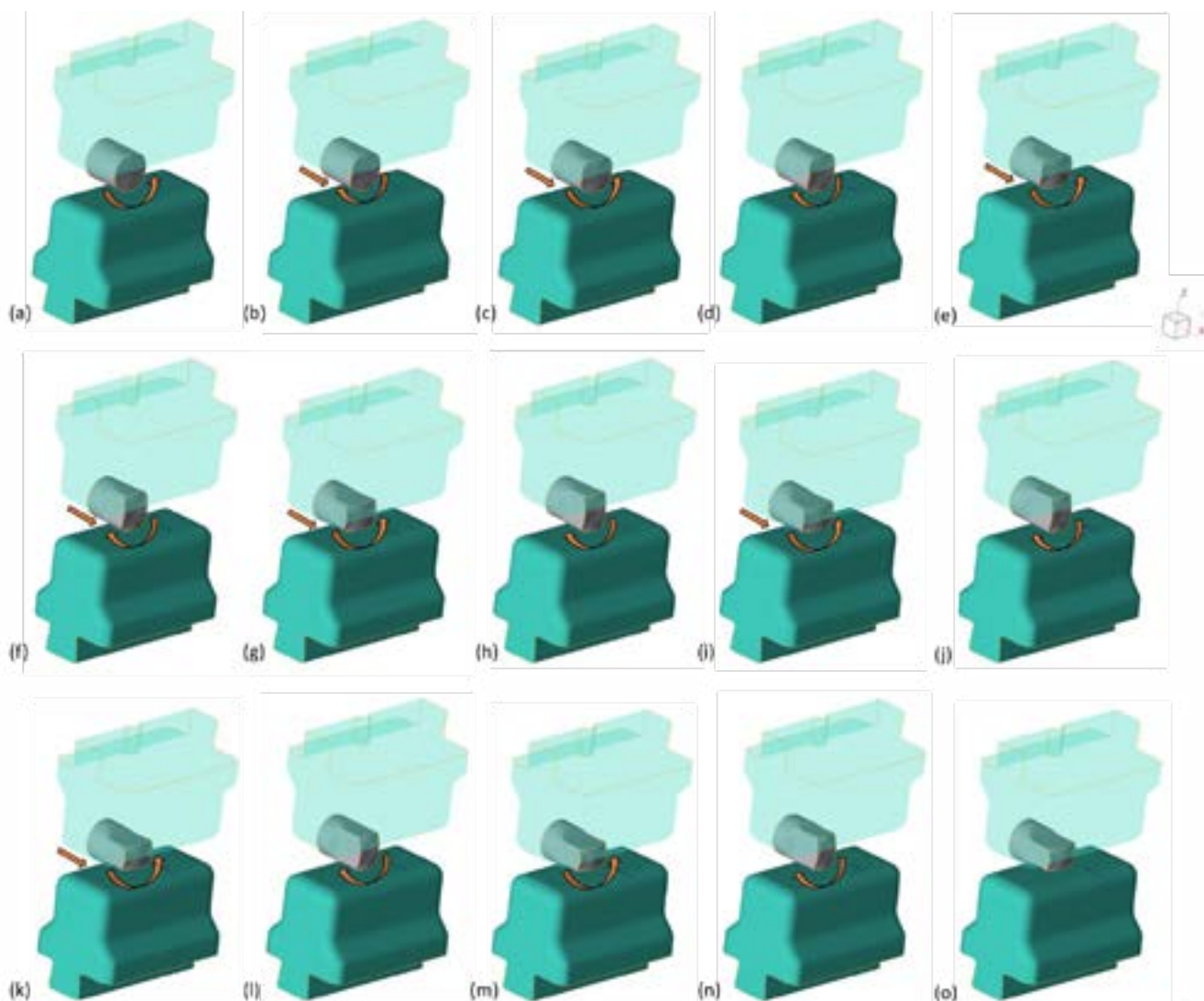


Figura 2 – Simulação da sequência de golpes realizados na conformação da pré-forma da peça Concha-Garfo.

A pré-forma partiu de um tarugo em aço SAE 1045, com 55,2 mm de diâmetro e 57,3 mm de comprimento. No primeiro golpe [Figura 2 (a)], o tarugo foi conformado e preparado para girar em 90° entorno do seu próprio eixo (ver seta de indicação). Já no segundo golpe [Figura 2 (b)], após ser girado em 90°, o tarugo foi então conformado e preparado para girar em 90° novamente e também ser deslocado na direção positiva do eixo X (ver setas de indicação), partindo assim para o terceiro golpe. Dando sequência, o tarugo foi sendo manipulado e golpeado até a obtenção da pré-forma desejada. Posteriormente, a pré-forma foi submetida a dois golpes de prensagem, resultando no forjado final apresentado na Figura 3. Este forjado passou ainda por uma etapa de rebarbação, seguida de resfriamento e usinagem.



Figura 3 – Peça Concha-Garfo forjada via simulação.

Visando padronizar da maneira melhor possível o procedimento de obtenção da pré-forma, bem como privilegiar uma repetibilidade dessa geometria na prática, a pré-forma foi impressa tridimensionalmente em material polimérico, criando um padrão físico para orientação operacional. Este padrão foi obtido a partir da exportação eletrônica da pré-forma simulada no formato STL, a qual foi utilizada para a realização da impressão, como pode ser constatado esquematicamente na Figura 4. O resultado foi a peça impressa mostrada na Figura 5.

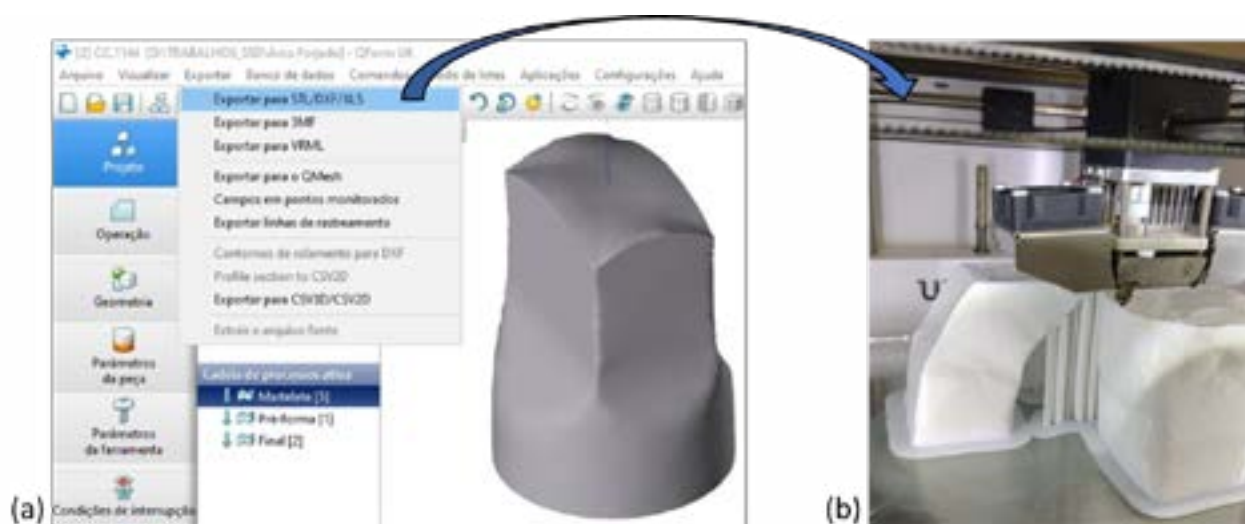


Figura 4 – (a) Pré-forma simulada e exportada para a (b) realização da impressão 3D.



Figura 5 – Pré-forma da peça Concha-Garfo impressa.

3. Braço de Direção (caso 2)

O segundo caso abordado possui uma complexidade maior em termos de plano de golpes e, além disso, dispõe da necessidade de se estabelecer duas pré-formas, sendo a segunda proveniente da primeira. A partir de um tarugo em aço SAE 4140, com 63,3 mm de diâmetro e 180 mm de comprimento, a primeira pré-forma foi conformada em 19 golpes no martelete, detalhados na Figura 6, a qual foi dobrada posteriormente em uma prensa mecânica, como mostrado na Figura 7.



Figura 6 – Simulação da sequência de golpes realizados na conformação da primeira pré-forma da peça Braço de Direção.

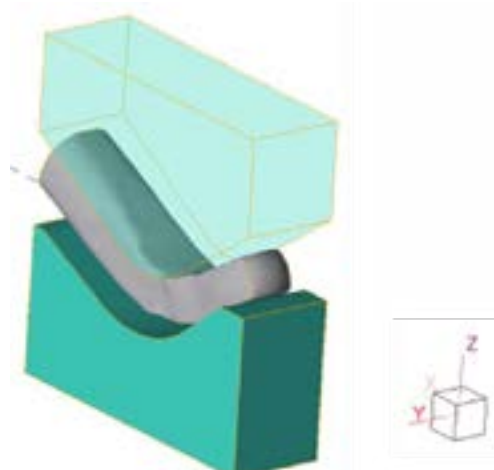


Figura 7 – Simulação da conformação da segunda pré-forma da peça Braço de Direção.

Embora a etapa de dobramento e obtenção da segunda pré-forma possua matrizes de formato semi-definido, essas se mantêm abertas lateralmente e o posicionamento da primeira pré-forma sobre elas demanda cuidado especial, tendo em vista que a segunda pré-forma precisa ser conformada de acordo com o projeto. A primeira pré-forma [Figura 6 (s)] e a segunda pré-forma (Figura 7) foram impressas em material polimérico e estão mostradas na Figura 9.

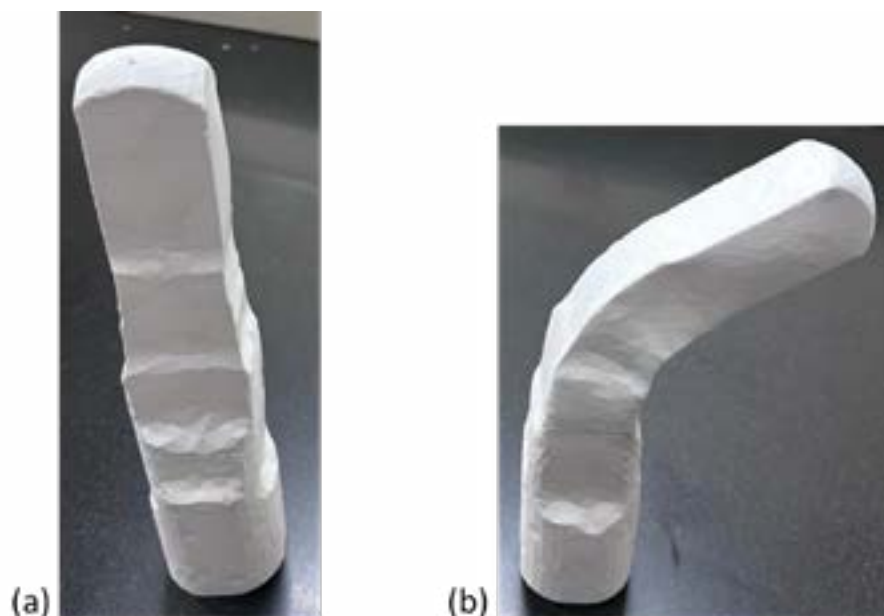


Figura 8 – Pré-formas da peça Braço de Direção impressas: (a) primeira e (b) segunda.

Uma vez obtida a segunda pré-forma, ela deve ter um posicionamento ótimo sobre a matriz inferior da operação seguinte, como demonstrado na Figura 9, a qual é realizada em uma prensa de parafuso. O forjado final tem então a forma apresentada na Figura 10, sendo posteriormente rebarbado, resfriado e usinado.



Figura 9 – Demonstração do posicionamento da segunda pré-forma da peça Braço de Direção sobre a matriz inferior do forjamento final.



Figura 10 – Braço de Direção forjado via simulação.

4. Conclusões

A simulação da conformação de pré-formas em marteletes permitiu estabelecer um plano de golpes e padronizar a operação. Além disso, possibilitou prever uma ótima pré-forma, bem como realizar a sua impressão 3D para estabelecer um modelo físico padrão para os profissionais de operação.

As fases de realização de tryout passaram a ser mais controladas e mais efetivas. Da mesma maneira, a repetibilidade geométrica das pré-formas durante o forjamento de manipulação manual aumentou, mesmo considerando a troca de operadores.

Automatizar a manipulação da pré-forma é agora uma possibilidade mais realística, tendo em vista a padronização projetada via simulação. Além disso, alguns desses processos de obtenção da pré-forma por marteletes têm sido substituídos por prensagem em matrizes, ação essa potencializada pelo uso da simulação e que visa eliminar variáveis de operação.



42nd S E N A F O R
26th International Forging Conference
25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming
Conference / 9th BrDDRG Congress
12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS
October 4-6, 2023

Aumento da Vida Útil das Matrizes de Forjamento a Quente de um Cubo com o Auxílio da Simulação

Die Life Increasing in a Hot Forging of a Cube Part Assisted by FE Simulation

Felipe S. Oliveira ⁽¹⁾
Nicholas Beggs ⁽¹⁾
Alisson S. Duarte ⁽²⁾

RESUMO

O desgaste de ferramentas de forjamento a quente é fator importante no custo do processo, tendo em vista a necessidade de paradas e reusinagens da ferramenta. Assim, o desgaste nas matrizes de forjamento de um cubo foi analisado por simulação computacional no software QForm UK, definindo o comportamento desse desgaste ao longo da superfície na direção radial. Com isso, foram realizadas alterações no processo simulado, as quais resultaram em um aumento de 100% na vida útil das matrizes. Além disso, também houve uma redução de 11% na quantidade de matéria prima. Como resultado, foi possível estabelecer um processo mais eficiente economicamente.

Palavras chave — Forjamento, Matrizes, Desgaste, Simulação, Elementos finitos.

Abstract

Die wear in hot forging is of a great importance in the process costs, considering the need of die's recovering and setup times. In this paper, die wear of a cube part forging was conducted by simulation using QForm UK software, finding the wear behavior along the die surface in the radial direction. Process changes were tested in the simulation and applied to the practice, which provided an 100% die life increasing, and also an 11% billet volume reducing. As a result, a more efficient process was achieved.

Key words — Hot Forging, Die Wear, Simulation, Finite Element.

⁽¹⁾ Dept. Engenharia; Arco Forjado, Brasil, engenharia5@arcoforjado.com.br

⁽²⁾ Eng. de Simulação; SIXPRO Virtual&Practical Process, Brasil, contato@sixpro.pro

1. Introdução

Desgastes em matrizes de forjamento a quente possuem importante impacto nos custos de processo. Uma vez que possuem relação direta com as tensões sofridas pelas matrizes, as quais são provocadas pelas pressões e pelas tensões cisalhantes exercidas na superfície, é possível realizar um estudo de previsão e de compreensão acerca das suas causas.

De acordo com o modelo de Archard, o desgaste, w , depende, entre outras variáveis, da pressão, p , regulada por um coeficiente empírico, a , e da tensão cisalhante, τ . Coeficientes empíricos são demandados para que se obtenha uma previsão da vida útil em fadiga, por exemplo, em profundidade por quantidade de peças forjadas. Quando esses coeficientes não são definidos ou mesmo correlacionados com valores de desgaste em prática, é possível trabalhar com o conceito de desgaste relativo.

Logo, a partir do modelo de Archard, os desgastes nas matrizes podem ser calculados em função das pressões normais (Equação 1) e das tensões cisalhantes (atrito) na superfície (Equação 2).

$$W_p = \int_0^t \frac{K_p \cdot p^a \cdot v_\tau^b}{Y_D^a} dt \quad (1)$$

$$W_\tau = \int_0^t \frac{K_\tau \cdot \tau \cdot v_\tau}{Y_D} dt \quad (2)$$

onde:

W_p e W_τ são o desgaste em função das pressões normais e das tensões cisalhantes (atrito) na superfície, respectivamente;

K_p e K_τ são coeficientes empíricos de pressão e de tração;

a e b são coeficientes empíricos;

v_τ é a velocidade tangencial do nó da peça em contato com a matriz [m/s];

p é a pressão na interface peça/ferramenta [MPa];

τ é tensão cisalhante no contato entre peça e ferramenta [MPa];

Y_D é o Limite de Escoamento do material da ferramenta [MPa];

t é o tempo de contato entre a peça e a ferramenta [s].

Neste artigo apresenta-se o desenvolvimento de análise e implementação de alterações no processo de forjamento a quente de uma peça denominada Cubo. Com isso, define-se uma metodologia de previsão do desgaste relativo, bem como da definição da vida útil da matriz em termos de quantidade de peças para atingir um desgaste crítico na região de formação da rebarba.

2. Forjamento de um cubo

O processo de forjamento a quente de um cubo está apresentado esquematicamente através da simulação via QForm UK (Micas Simulation Ltd., Oxford, UK) na Figura 1, na qual a matriz superior não está mostrada. Um tarugo em aço SAE 1045 é aquecido a 1.150 °C, transferido por 3 s para uma prensa parafuso de 250 tf, centralizado sobre a matriz inferior em aço comercial VMO e, após 1 s de repouso, golpeado uma vez para formar o forjado final. A interface peça-ferramenta foi condicionada segundo Levanov, com um fator de atrito de 0,7, coeficiente de atrito de 0,15 e coeficiente de transferência de calor de 45 kW/m².K.

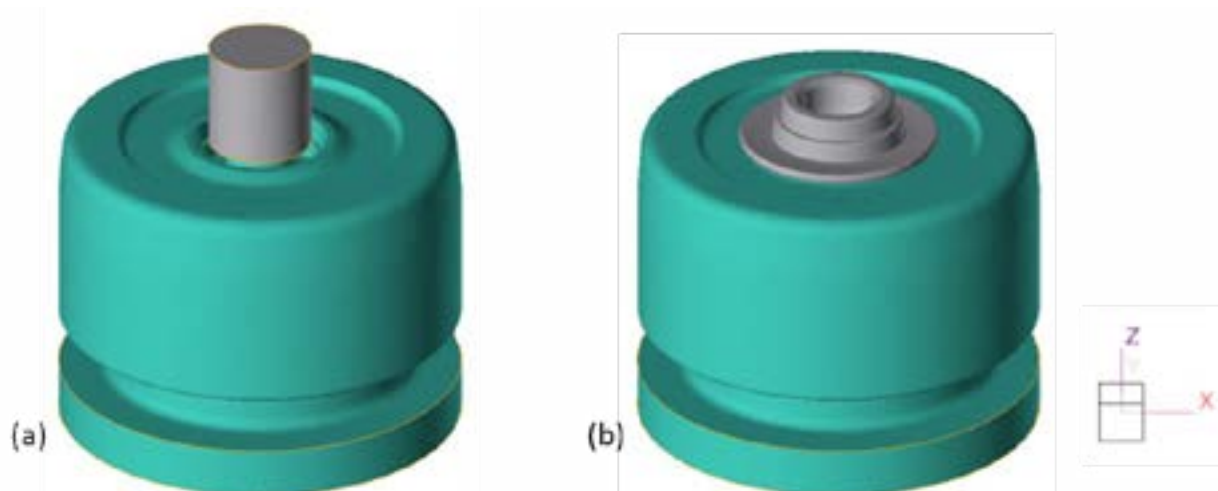


Figura 1 – Simulação do forjamento a quente de um cubo: (a) início e (b) fim.

A matriz inferior sofreu um desgaste excessivo após o forjamento de 800 peças, como mostrado na Figura 2. Entretanto, o desgaste ocorrido na região da linha da rebarba (indicado pela seta vermelha) foi especialmente crítico. Assim, com o consequente aumento do plano de formação da rebarba, torna-se necessário intervir no processo e retirar a ferramenta para ser retrabalhada.



Figura 2 – Fotografia da matriz antiga mostrando intenso desgaste na região da rebarba (seta vermelha) após produzir 800 peças.

3. Melhoria do processo

Visando aumentar a produtividade e reduzir os custos de fabricação do cubo, foram testadas alterações com foco principal na redução do desgaste da matriz na região de formação da rebarba. Para reduzir o desgaste na rebarba, buscou-se reduzir o volume da rebarba, ou seja, reduzir o volume do tarugo inicial. Logo, foi testada a alteração no tarugo mostrada na Figura 3, representando uma redução de 11% no volume da matéria prima.

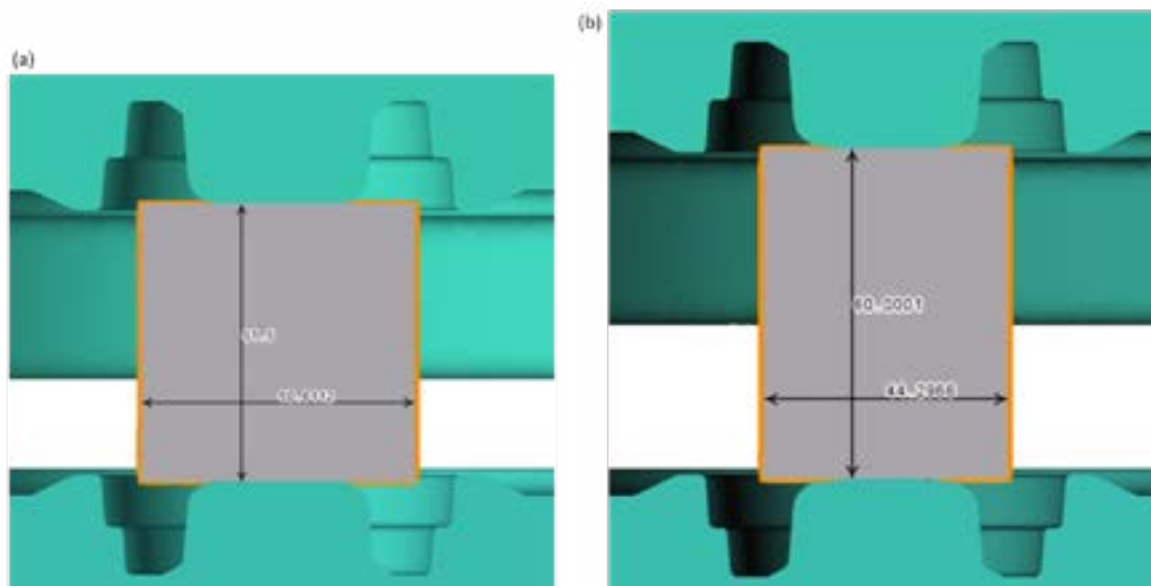


Figura 3 – Dimensões dos tarugos nos processos (a) antigo e (b) novo.

Para viabilizar a alteração nas dimensões do tarugo, as matrizes foram modificadas na região central indicada pelo círculo vermelho na matriz inferior na Figura 4, proporcionando um preenchimento completo das matrizes, ainda que o volume do tarugo fosse menor. Com isso, a forma final da nova rebarba obtida está mostrada comparativamente à forma antiga na Figura 5. Verifica-se ainda que a espessura central também teve a sua magnitude diminuída.

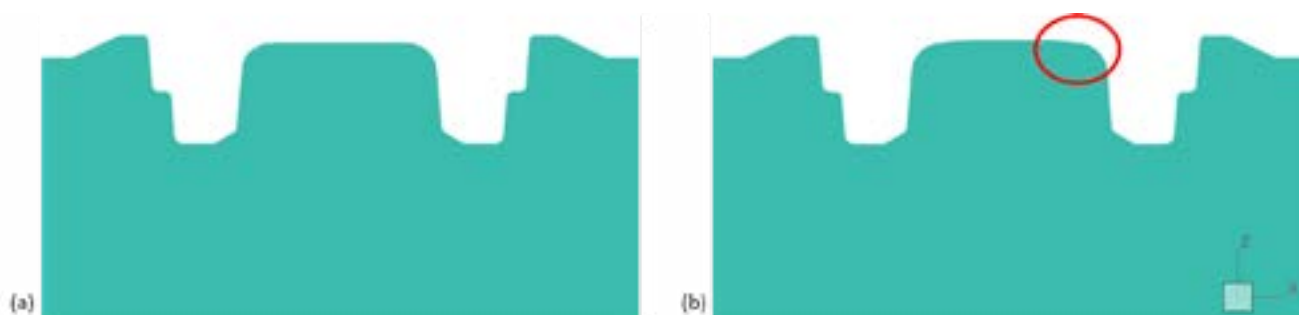


Figura 4 – Seção transversal das matrizes (a) antiga e (b) nova.

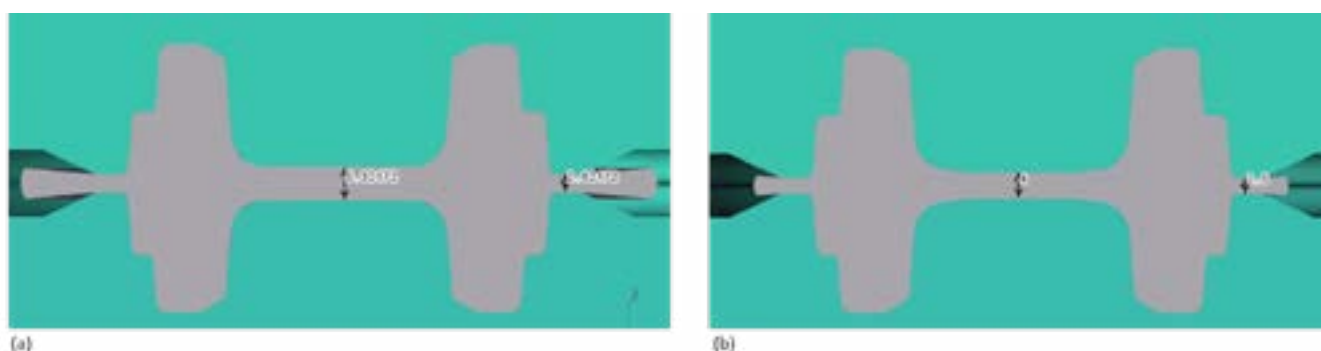


Figura 5 – Espessuras finais nos processos (a) antigo e (b) novo.

Tendo a redução de volume da rebarba sido viabilizada através de testes por simulação, foi preciso investigar uma possível redução no desgaste das matrizes. Assim, o desgaste relativo na matriz inferior foi previsto como mostrado na Figura 6. É possível observar que na matriz antiga a região de formação da rebarba apresenta cores mais quentes do que na matriz nova, indicando uma efetiva redução do desgaste nessa região.

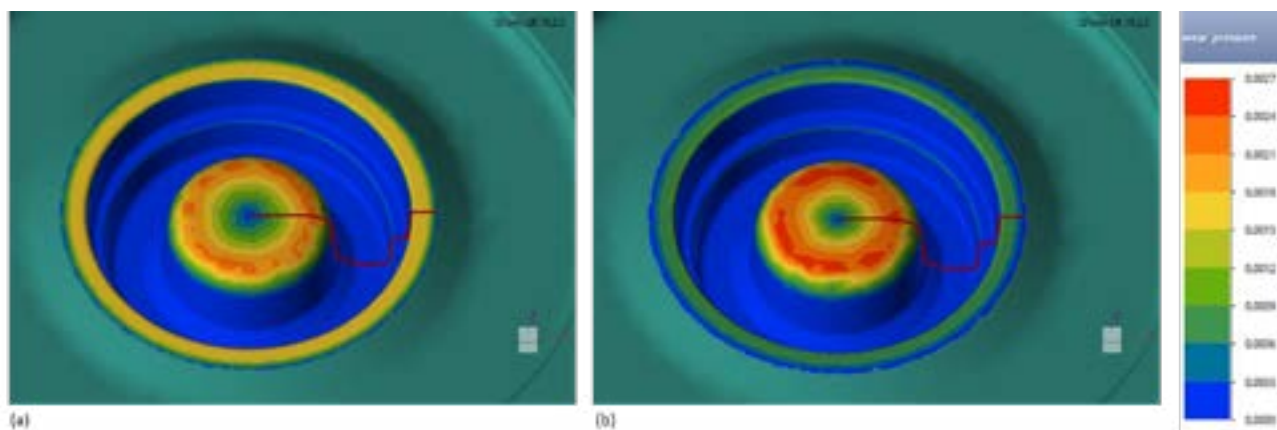


Figura 6 – Previsão do desgaste relativo ao longo da superfície das matrizes (a) antiga e (b) nova.

O desgaste relativo simulado foi medido na superfície das matrizes inferiores em análise, na direção radial ao longo das linhas mostradas na Figura 6. Assim, foi possível quantificar a evolução do desgaste desde o centro das matrizes até a região da rebarba. Embora a região central da matriz não seja crítica para determinar a sua vida útil, vale observar na Figura 7 que a região central, aproximadamente 10 mm na direção radial, dispõe de um considerável desgaste, tendo esse sido pouco alterado entre o processo antigo e o novo. Embora o novo projeto da matriz tenha facilitado o escoamento do material, a redução empregada no material naquela região foi mais severa do que a redução empregada anteriormente. Já em relação à região crítica da matriz, ou seja, à região de formação da rebarba em aproximadamente 60 mm na direção radial, o desgaste relativo caiu pela metade, saindo de 2,6 e indo para 1,3 ($10^{-3} \cdot wear/K_w$). Este resultado pressupõe que a vida útil da matriz nova seja aumentada para o dobro da antiga.

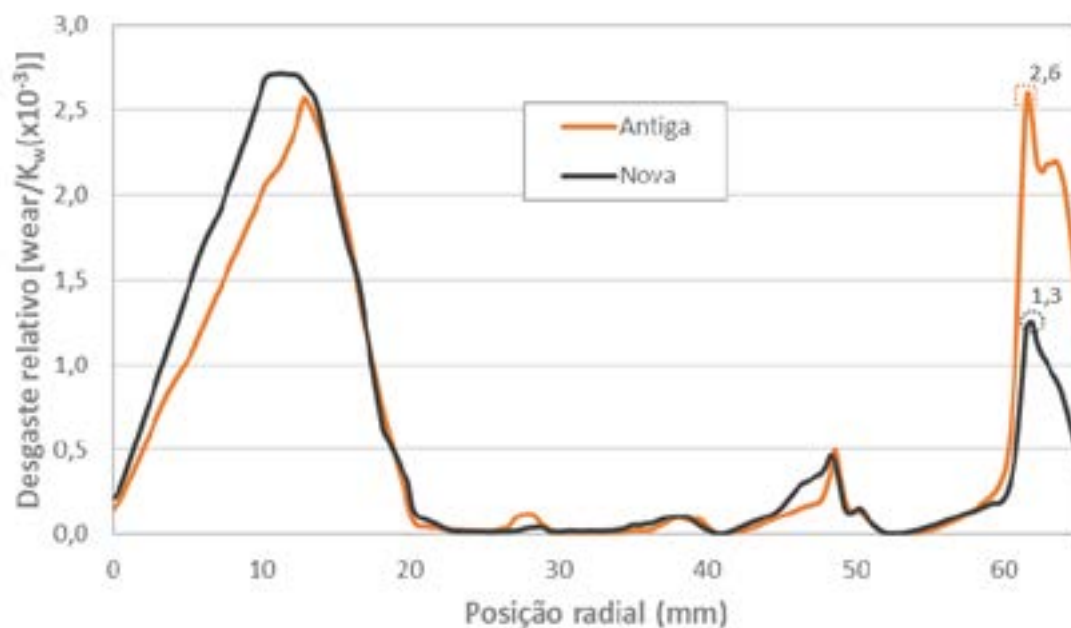


Figura 7 – Previsão do desgaste relativo nas superfícies na direção radial das matrizes (a) antiga e (b) nova.

Confeccionada e colocada em linha para produção de peças, uma fotografia da matriz nova foi tirada após um ciclo de 800 peças, como pode ser visto na Figura 8. O aspecto da superfície da matriz indica um desgaste significativamente reduzido na região de formação da rebarba, comparado à matriz antiga (Figura 2). Mais do que isso, observou-se a necessidade de retrabalhar a matriz somente após um ciclo de 1.600 peças, corroborando com a previsão de aumento da vida útil baseada nos cálculos de desgaste relativo (Figura 7). Correlacionando o desgaste relativo, w_{rel} , ($10^{-3} \cdot wear/K_w$), com o ciclo de vida útil da ferramenta, N_F , foi estabelecida a Eq. 3, resultando no perfil de comportamento da vida útil da matriz, com foco na região de formação da rebarba, apresentado na Figura 9.

$$N_F = -600 \cdot w_{rel} + 2.350. \quad (\text{Eq. 3})$$



Figura 8 – Fotografia da matriz nova mostrando reduzido desgaste na região da rebarba após produzir 800 peças.

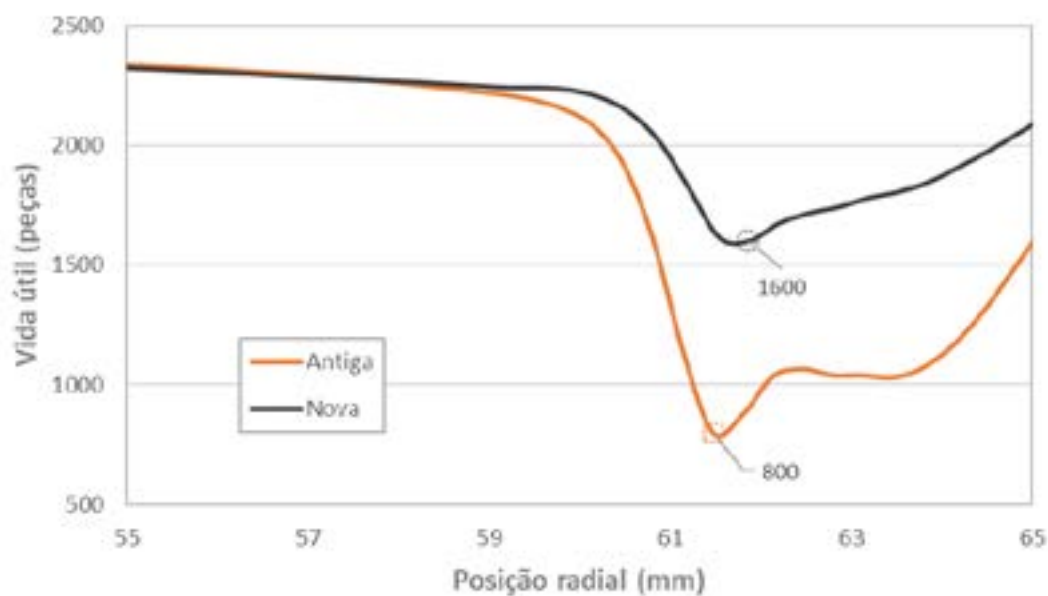


Figura 9 – Previsão da vida útil da matriz na região de formação da rebarba na direção radial: (a) antiga e (b) nova.

4. Conclusões

Mediante a elaboração de um modelo com base no Método dos Elementos Finitos, foi possível prever a intensidade do desgaste nas matrizes, bem como testar modificações no processo com objetivo de verificar a redução desse desgaste. Estudos correlacionando alterações na geometria da região central

da matriz, proporcionando melhor escoamento do metal, e alterações nas dimensões do tarugo, foram conduzidos. Dessa maneira, foi possível dobrar a vida útil das matrizes de forjamento, além de reduzir em 11% a quantidade de matéria prima. Essas alterações foram implementadas e aprovadas na linha de produção.



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil
26th International Forging Conference

**25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de
Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDR**

*25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming
Conference / 9th BrDDR Congress*

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis

12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

Estudo da influência dos parâmetros de esferoidização do aço SAE 8620 na conformabilidade por forjamento a frio

Dany M. A. Centeno ⁽¹⁾
Felipe Moreno S. B. de Carvalho ⁽²⁾
Leonardo Rodrigues Danninger ⁽³⁾
Sandra da Silva Munarim ⁽⁴⁾
Camila de Brito Ferreira ⁽⁵⁾
Henrique Morales Zaggo ⁽⁶⁾
Ana Paola Villalva Braga ⁽⁷⁾

RESUMO

O processo de forjamento a frio, apesar de requerer maiores cargas de conformação, apresenta diversas vantagens em relação ao processo a quente. Dentre as vantagens, o forjamento a frio possibilita maior precisão dimensional dos componentes, melhor acabamento superficial e maior produtividade em relação ao mesmo processo a quente. Nesse contexto, aços para construção mecânica do tipo SAE 8620 são usualmente conformados por forjamento a frio na condição esferoidizada e, em seguida, submetidos a tratamento térmico de tempera, revenimento e cementação para garantir as propriedades mecânicas requeridas em serviço. O trabalho investiga a influência dos parâmetros (tempo e temperatura) de tratamento térmico de esferoidização no desenvolvimento microestrutural e seu efeito na conformabilidade a frio do aço comercial SAE 8620. Foram realizados dois diferentes tratamentos térmicos e realizados ensaios de tração sob diferentes taxas de deformação, obtendo assim as curvas de escoamento desse material tratado. As curvas foram utilizadas para alimentar o modelo computacional de elementos finitos (MEF) desenvolvido no trabalho que prevê o comportamento do material durante o forjamento a frio. Variando-se os parâmetros de tempo e temperatura, foi possível obter diferentes microestruturas que permitiram relacionar como os parâmetros de tratamento térmico afetam a microestrutura, grau de esferoidização e probabilidade de nucleação de trincas durante o processo de forjamento a frio da liga SAE 8620.

ABSTRACT

The cold forging process usually requires higher forming loads, however, it has several advantages over the hot process. Among the advantages, cold forging guarantees greater dimensional precision of components, better surface quality, and higher productivity compared to the hot process. In this context, SAE 8620 steels widely used for mechanical components are usually cold forming in the spheroidized condition and, subsequently, heat treated by quenching, tempering and carburizing to achieve the mechanical properties required in service. This work investigates the influence of the spheroidization heat treatment parameters (time and temperature) on the microstructural development and its effect on cold formability of commercial steel SAE 8620. Two different spheroidization heat treatments (varying temperature and time) and tensile tests were carried out under different strain rates, thus obtaining the flow curves of the material subjected to different heat treatment parameters. The flow curves were used as input data for the finite element computational model (FEM) developed in the work that predicts the material's behavior during cold forging. By varying the spheroidization parameters, it was possible to obtain different microstructures that presented different degrees of spheroidization to allow relating how the spheroidization parameters affect the microstructure, degree of spheroidization, and probability of crack nucleation during the cold forging process of SAE 8620 alloy.

Keywords — Spheroidization, cold formability, heat treatment, forming Simulation

⁽¹⁾ PhD Ing.; Pesquisador & Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Brazil. dcenteno@ipt.br

⁽²⁾ MSc. Ing.; Pesquisador & Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Brazil. fcarvalho@ipt.br

⁽³⁾ MSc. Ing.; Pesquisador & Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Brazil. ldanger@ipt.br

⁽⁴⁾ BSc. Ing.; Técnico especializado & Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Brazil. munarim@ipt.br

⁽⁵⁾ MEng. Ing.; Pesquisa, Desenvolvimento & Inovação Gerdau Aços Especiais, Brazil. camila.ferreira@gerdau.com.br

⁽⁶⁾ Ing.; Pesquisa, Desenvolvimento & Inovação Gerdau Aços Especiais, Brazil. henrique.zaggo@gerdau.com.br

⁽⁷⁾ PhD. Ing.; Pesquisador & Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Brazil. anapaola@ipt.br

1. INTRODUÇÃO

Processos de conformação são altamente dependentes da ductilidade do aço, o qual está completamente condicionado à microestrutura de partida [1]. Assim, industrialmente, os aços na condição bruta de laminados não apresentam as características de ductilidade suficientes para processos de conformação a frio, sendo dependentes de tratamentos de recozimento ou esferoidização posteriores [2]. Durante esses tratamentos, a matriz microestrutural, normalmente composta por ferrita e cementita, amolece pelo processo de esferoidização ou globularização da cementita. Essa microestrutura esferoidizada é conhecida por melhorar a conformabilidade a frio do material, garantindo a imposição de elevada deformação plástica com diminuição da carga de conformação durante o processo de fabricação. No entanto, sabe-se que os tratamentos de esferoidização consomem grande quantidade de tempo e energia, os quais têm sido a principal motivação para promover o desenvolvimento de diferentes processos para reduzir a duração do tratamento. Alguns deles são relacionados ao condicionamento da microestrutura inicial antes do tratamento de recozimento e outros modificam o processo aplicando deformação severa prévia ou alterando o ciclo de tratamento.

Convencionalmente, as barras laminadas de aço médio carbono possuem uma matriz microestrutural composta por ferrita, perlita e/ou bainita obtida por um processo de resfriamento logo após a laminação. Nesse sentido, existe uma vasta literatura discutindo as limitações de conformabilidade a frio da matriz perlítica quando são requeridos elevados níveis de deformação plástica. Deste modo, a esferoidização da cementita, assim como o grau de esferoidização atingido, tornam-se parâmetros base para delimitar a propensão a uma boa conformabilidade a frio. No entanto a taxa de esferoidização está condicionada à microestrutura de partida, sendo que, para o comparativo de uma matriz perlítica fina e outra grosseira, a perlita fina tem maior potencial de esferoidização. Por outro lado, no caso do comparativo de matrizes microestruturais martensítica, bainítica e perlítica, a martensita tem o maior potencial de esferoidização [3]. Já entre a perlita e a bainita, a bainita mostra uma leve vantagem. Esse comportamento foi discutido por Kamyabi-Gol e Sheikh-Amiri [4], os quais mostram que os níveis de defeitos na martensita potencializam a taxa de esferoidização, sendo esta característica extrapolada para microestruturas bainíticas e perlíticas, de forma que pontos com defeito na lamelaridade da perlita têm maior potencial de esferoidização.

Para efeito de classificação no processo de esferoidização segue-se o comparativo direto com padrões de micrografias a 1000x de magnificação mostrados na norma ASTM F2282. Essa categorização possui correspondentes de esferoidização considerando o 100% de esferoidização, assim como microestruturas não esferoidizadas mantendo a matriz microestrutural inicial. Essa classificação exhibe, também, uma escala de esferoidização parcial da cementita. Como indicativo da morfologia atingida, o padrão inclui as letras G ou L antes dos números como uma indicação da natureza globular ou lamelar da microestrutura, respectivamente. Essa especificação corresponde a condições em que a maioria da cementita apresenta uma distribuição média esferoidal, podendo haver também frações menores de cementita com morfologia ainda lamelar. A norma também exige que a microestrutura atenda a uma frequência de esferoidização superior a 60%. Apesar das diferentes formas de melhorar o processo de conformação, uma possível definição do grau de esferoidização segundo o nível de deformação e utilização final é um ponto a ser explorado. Com o intuito de se minimizar custos e tempos de desenvolvimento de produtos forjados, nos últimos anos diversas indústrias passaram a utilizar simulações com base no Método dos Elementos Finitos (MEF) para analisar o comportamento do material durante a deformação e auxiliar no planejamento de processos e predições de defeitos em peças forjadas [5,6]. No presente estudo, métodos de tratamento de esferoidização subcrítico, segundo escala industrial, foram realizados para o aço SAE 8620 com o intuito de analisar o comportamento de esferoidização na sua conformabilidade a frio. Posteriormente, foram realizadas medidas de dureza Vickers e ensaios uniaxiais de tração para avaliar e comparar as propriedades mecânicas entre o material apenas laminado e o tratado termicamente. A partir desses dados foram realizadas as simulações 3-D por elementos finitos usando o software FORGE® para estabelecer os limites de conformabilidade do material tratado. A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi empregada para a caracterização detalhada da microestrutura.

2. MATERIAIS E METODOS

No presente trabalho, o material estudado foi o aço SAE 8620 fornecido na condição de barra laminada. Apresenta-se na Tabela 1 a composição química nominal do aço.

Tabela 1 – composição química do aço SAE 8620 (%massa)

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	S	P
0,18 - 0,23	0,70 - 0,90	0,15 - 0,35	0,40 - 0,60	0,40 - 0,70	0,15 - 0,25	máx. 0,040	máx. 0,035

2.1 Tratamentos térmicos

Considerando que a taxa e grau de esferoidização da cementita é afetada pelo ciclo térmico imposto, foram estudados dois ciclos térmicos subcríticos. Esses ciclos térmicos foram definidos entre as faixas de 690 °C - 735 °C e 660 °C - 690 °C por 2 horas, como mostrado na Figura 1. A denominação dos tratamentos foi de E1 e E2, sendo que a temperatura mais elevada corresponde a ao primeiro tratamento. A diferença de temperatura entre cada condição de tratamento foi estabelecida em 40 °C. Após o tratamento de esferoidização o material foi resfriado rapidamente ao ar. A temperatura foi monitorada por termopares tipo K inseridos nos corpos de prova. O tempo de tratamento foi selecionado segundo o padrão de tratamento industrial.

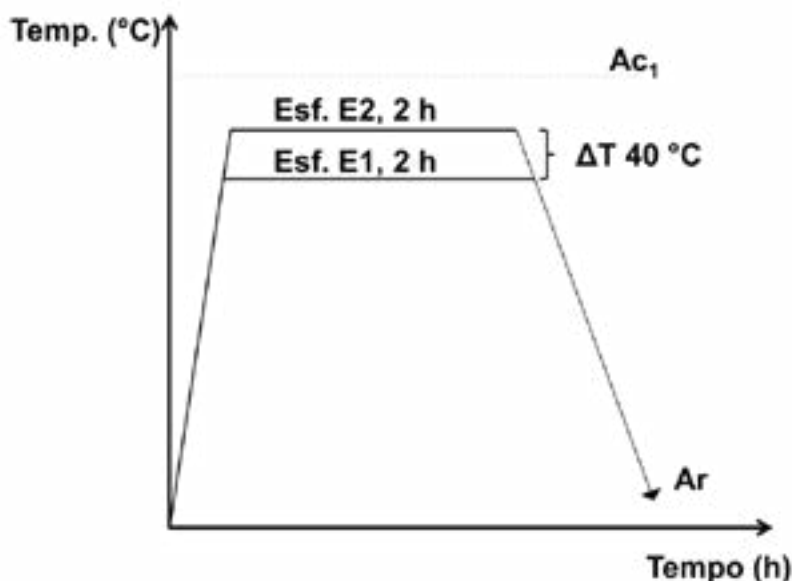


Figura 1 – Ciclo térmico de esferoidização estudado.

2.2 Caracterização microestrutural

Foram cortadas amostras representativas da seção longitudinal das barras do aço SAE 8620 na condição de laminadas e tratadas termicamente. Essas amostras foram preparadas metalograficamente seguindo a sequência de lixamento e polimento padrão. Uma vez preparadas as superfícies de análise, as amostras foram atacadas metalograficamente com a solução de Nital 2%.

A aquisição das imagens foi realizada através de microscopia ótica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) utilizando um microscópio Karl Zeiss e um FEG FEI, respectivamente.

2.2.1 Grau de esferoidização

O grau de esferoidização foi quantificado por análise de imagem em micrografias obtidas por MEV com magnificação de 15000 vezes considerando regiões aleatórias. Todas as medições foram realizadas utilizando o software ImageJ. O critério de esfericidade das partículas de cementita foi realizado através da relação de aspecto inferiores a 3 seguindo a referência do trabalho O'Brien e Hosford [7]. Partículas com área menor que $0,001 \mu\text{m}^2$ não foram consideradas na análise. Assim, o grau global de esferoidização foi determinado como a razão entre a área constituída pelas cementitas esferoidizadas e a área total da cementita (esferoidizada e não esferoidizada).

2.3 Propriedades mecânicas

Medidas de dureza Vickers foram realizadas utilizando a carga de 10 kg. Para cada condição de tratamento foram feitas 10 medições em regiões aleatórias.

2.4 Simulação do processo de conformação

No presente estudo, o software comercial de elementos finitos FORGE[®] NxT 4.0 foi utilizado para simular o processo de conformação a frio. A modelagem das matrizes de forjamento e da peça foi realizada no software SOLIDWORKS 2018.

2.4.1 Modelo computacional e condições de contorno

O material do corpo de prova é o SAE 8620 com dimensão de 43 mm de altura e 28,6 mm de diâmetro. As propriedades mecânicas do material em diferentes condições de tratamento térmico (tabela 2) foram obtidas através de ensaios de tração uniaxiais (5 taxas de deformação em tréplica) e posteriormente foram utilizados como dados de entrada para o modelo computacional através do Material Data Tool do próprio software.

Tabela 2 – Propriedades mecânicas nas diferentes condições de tratamento térmico

Propriedade	Bruta de laminação	Condição E1	Condição E2
E (MPa)	199.765	211.785	200.582
LE (MPa)	350	355	370
LR (MPa)	599	518	529
ϵ_{LR} (mm/mm)	0,121	0,158	0,143
Critério de dano	0,17	0,22	0,20

Apenas o corpo de prova foi considerado como um material deformável (estando sujeito a regra de Von-Mises para deformação plástica), enquanto as matrizes foram consideradas como corpos rígidos (não deformáveis). Devido a condições de simetria, apenas metade do conjunto corpo de prova + matrizes foi modelado. Tanto a temperatura inicial do corpo de prova quanto das matrizes foram determinados como sendo a 20 °C; as condições de atrito e condução de calor entre o cdp e as matrizes de forjamento foram definidas com base nas bibliotecas disponibilizadas pelo software e selecionando-se o caso que mais se assemelha ao caso estudado. Para a simulação do forjamento a frio, considerou-se uma prensa mecânica com capacidade de 100 golpes/minuto e um comprimento de golpe de 37 mm.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA INICIAL

A microestrutura inicial do material na condição de laminado (BL) é apresentada nas Figura 2 e 3. As micrografias obtidas por MO na Figura 2, mostram uma perspectiva geral da microestrutura, sendo que as fases presentes podem ser identificadas como a ferrita proeutetóide (F, regiões claras), bainita (B, regiões agulhadas, mistura de regiões claras e escuras, ver Figura 2b) e perlita (P, regiões escuras). Segunda a medição da fração de fases, a ferrita compõe aproximadamente $50\pm 6\%$, a bainita $38\pm 8\%$ e a perlita $12\pm 4\%$ (canto inferior Figura 2a). Nota-se, também, na Figura 2a as bandas de laminação no bulk e a morfologia deformada da ferrita. Esse estado inicial da microestrutura deformada contribuiria com um aumento na taxa de esferoidização durante o tratamento térmico [8].

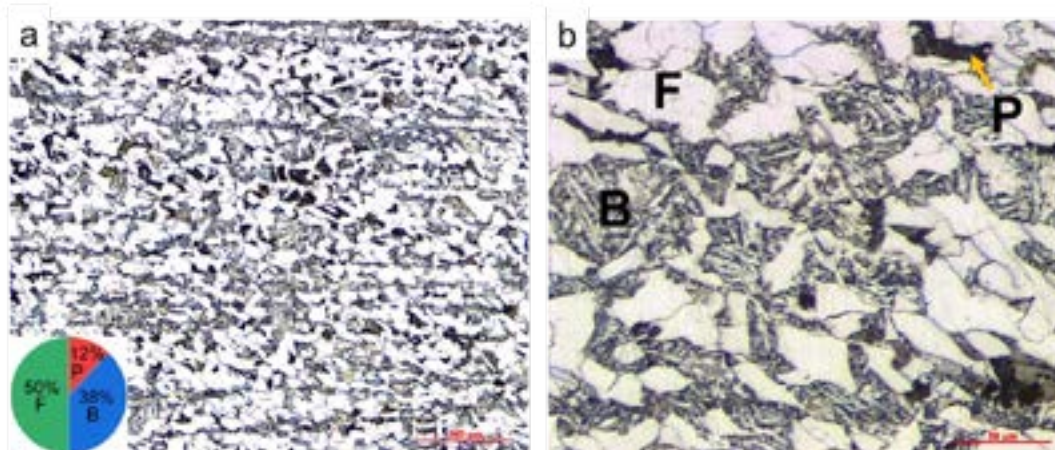


Figura 2 – Caracterização por MO do aço SAE 8620 na condição como laminado, BL. a) magnificação de 100X (detalhe gráfico torta com as frações das fases presentes); b) magnificação de 500X.

Na Figura 3, micrografias obtidas por MEV mostram detalhadamente a microestrutura da barra apenas laminada. Como pode ser observado, a região identificada como bainita (B) mostra uma morfologia de carbonetos bastante complexa. Também é possível notar que a perlita forma-se nos limites entre a bainita e a ferrita, mostrando uma morfologia bastante refinada. Quando comparadas proporções de bainita e perlita verifica-se que há uma maior fração de bainita, o qual indica que após a laminação a taxa resfriamento favorece a formação de bainita. Devido à rejeição de carbono da ferrita, formam-se linhas descontínuas de cementita ao longo das interfaces da ferrita. Em maior aumento, observa-se a presença das ilhas de perlita, consistindo de cementitas quebradas e refinadas com baixo espaçamento interlamelar. Essas ilhas nuclearam em alguns contornos de grão austeníticos anteriores.

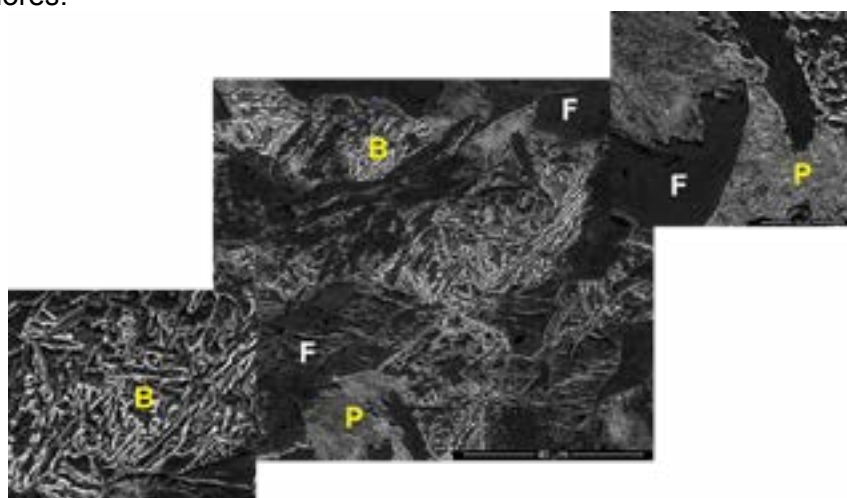


Figura 3 – Caracterização por MEV do aço laminado. Figura superior direito detalha a microestrutura perlítica. Figura inferior esquerda detalha microestrutura bainítica.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA TRATADA

A Figura 4 mostra as imagens por MO do material tratado nas condições de temperaturas E1 e E2. As Figuras 4a e 4c permitem destacar uma visualização geral da microestrutura formada para ambas as condições de estudo. De forma geral, nota-se que para ambos os tratamentos ainda são perceptíveis algumas bandas de segregação. Adicionalmente, nas Figuras 4b e 4d, nota-se que devido ao processo de esferoidização a ferrita proeutetóide tende a uma morfologia mais poligonal/equiaxial. Nas micrografias com maior aumento (Figura 4b e d), percebe-se que a região onde inicialmente distinguia-se bainita e perlita, agora após o tratamento não é mais notada a morfologia dessas fases. No entanto, a condição de tratamento de menor temperatura, E1, mostra alguns resquícios da morfologia ripada da bainita, como indicado pelas setas vermelhas na Figura 4b.

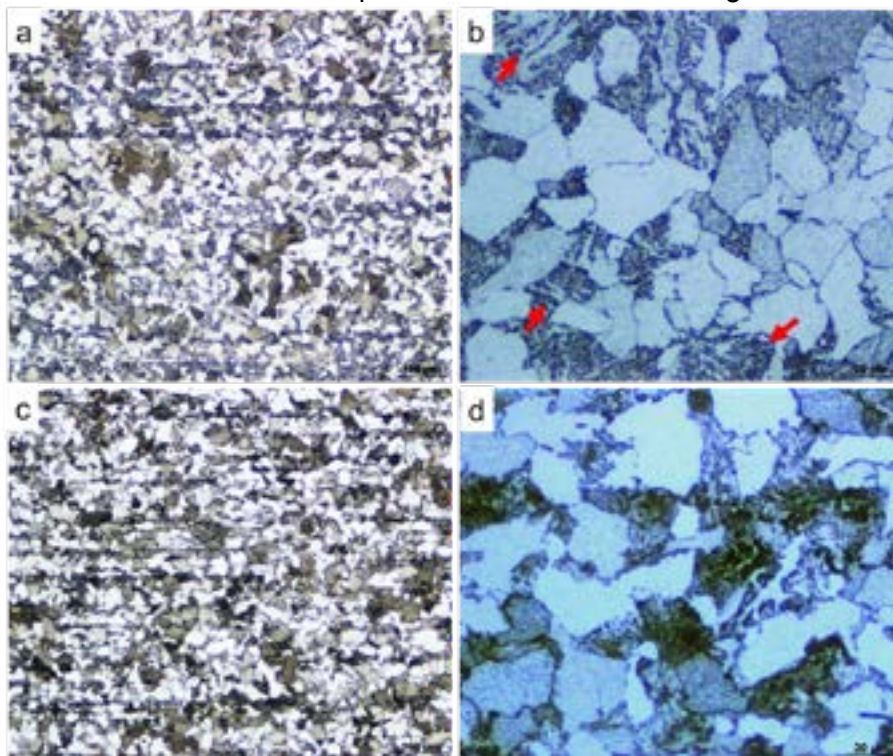


Figura 4 – Caracterização por MO do aço tratado a) e b) E1; c) e d) E2.

A caracterização mais detalhada da microestrutura após os tratamentos de esferoidização nas duas condições de estudo foram obtidas por MEV, como pode ser observado na figura 5. Nota-se que para a condição de esferoidização E2 (Figura 5b), a estrutura tende a formar carbonetos com morfologia esferoidizada, no entanto existem alguns pontos que não atingiram a completa morfologia de cementita esferoidizada, sendo apenas observada descontinuidade das lamelas da perlita, assim como a quebra de faixas da bainita. Por outro lado, uma morfologia mais esférica pode ser observada em regiões onde previamente era bainítica. Em contrapartida, as amostras tratadas na condição E1 mostra regiões esferoidizadas, assim como também várias regiões lamelares em alguns contornos de ferrita e perlita. O processo de esferoidização é governado por mecanismos de difusão, consequentemente, o grau de esferoidização depende da cinética desse mecanismo. Quanto mais elevada a temperatura de tratamento maior o potencial de esferoidização [9]. Assim, o grau de esferoidização é drasticamente reduzido com a diminuição da temperatura de tratamento, como corroborado entre as condições de estudo.

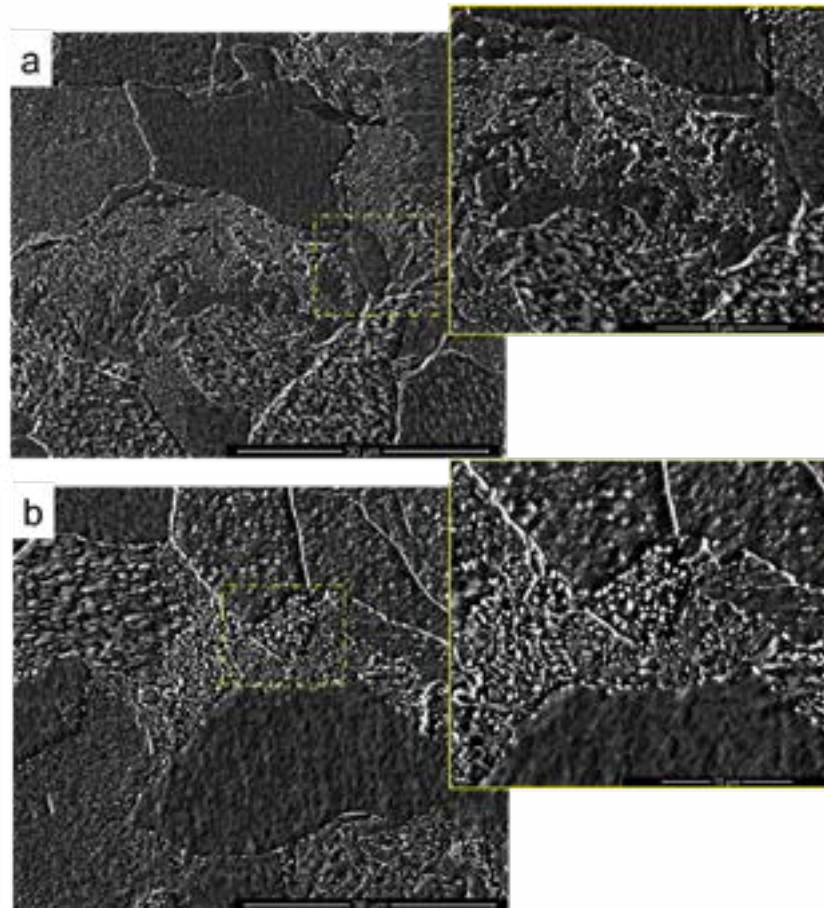


Figura 5 – Caracterização por MEV aço esferoidizado. A) E1, e b) E2.

A eficácia dos tratamentos térmicos em relação ao grau de esferoidização e sua relação de aspecto foram determinados seguindo os critérios apresentados no item 2.21, como mostrado na Figura 6. As Figuras 6a e 6b representam em detalhe as regiões que foram tomadas para realizar os cálculos de quantificação das partículas de cementita para as duas condições tratadas. Quando comparados os dois tratamentos, nota-se claramente o estágio intermediário de partículas de cementita esferoidizadas e lamelas fragmentadas para o tratamento E1, diferente do tratamento E2, onde as partículas de cementita tem uma morfologia globular mais engrossada. O grau de esferoidização para o tempo de tratamento de 2 horas para a condição E2 foi de aproximadamente 40 %, em contraste para a condição E1 que foi de 20%. Esse resultado, conforme dados de literatura, mostra maior cinética de esferoidização expressado no maior grau de esferoidização na temperatura mais alta de tratamento, como plotado na Figura 6c. Além disso, para a temperatura de tratamento mais alta, E2, a relação de aspecto média mostra uma forma mais globular. Esses dados permitem corroborar a sensibilidade da cinética de esferoidização em relação a temperaturas próximas da temperatura Ac1 quando tratados subcriticamente.

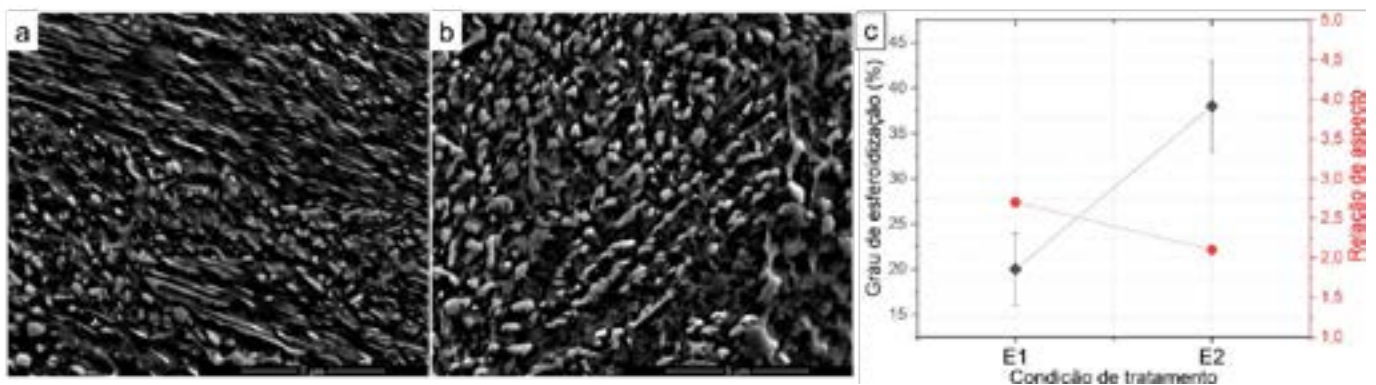


Figura 6 – Caracterização das partículas de cementita a) condição E1, b) condição E2, e c) quantificação do grau de esferoidização e relação de aspecto para ambas as condições.

Para entender o desenvolvimento da esferoidização em cada condição estudada, deve-se considerar que apesar do estado inicial da microestrutura ser igual em ambas as condições; em relação a fases iniciais e grau de deformação da barra laminada, a sensibilidade ao fator temperatura condiciona a evolução da esferoidização das partículas de cementita. Essencialmente, para difusão de carbono ocorrer deve-se atingir a diferença no potencial químico, que é uma função sensível ao efeito da temperatura [10]. Essa relação pode ser corroborada a partir da conhecida equação de Gibbs-Thompson [11]. Dessa forma, apesar de ser atingido o potencial de difusão de carbono, algumas regiões da microestrutura sofrem uma taxa de difusão muito lenta levando a uma cinética de quebra de lamelas demorada. Para as condições estudadas, na condição E2, de maior temperatura de tratamento, a taxa de difusão de carbono é elevada, além de acontecer nos diferentes pontos da microestrutura com o potencial mínimo. Esse fenômeno é observado parcialmente na condição de menor temperatura. Quando comparados os valores de tamanho de partícula de cementita esferoidizada em função do grau de esferoidização, a condição E2 mostra partículas com tamanho mais uniforme do que a condição E1, como apresentado na tabela 3. Precisamente, esse fenômeno acontece devido à melhor redistribuição do carbono na condição E2. No entanto, esse fator pode ser equilibrado aumentando o tempo de tratamento além das duas horas.

Tabela 3 – Tamanho de partícula esferoidizada e grau de esferoidização para as condições de tratamento E1 e E2 medidos em 5 campos diferentes por amostra.

Condição	Tamanho de partícula (μm^2)	Grau de esferoidização (%)
E1	$0,052 \pm 0,015$	20 ± 4
E2	$0,041 \pm 0,008$	40 ± 5

3.3 ENSAIOS MECÂNICOS

3.3.1 DUREZA VICKERS

A Figura 7 mostra o comparativo das medidas de dureza entre a condição como laminado (BL) e o material com o tratamento de esferoidização na condição E1 e E2. Para cada dado apresentado foi realizada a média aritmética do resultado obtido a partir de 10 pontos de dureza distribuídos de modo aleatório nas amostras. Segundo os dados plotados, nota-se claramente a queda da dureza quando o material é tratado subcriticamente. A queda de dureza a partir do material BL é de aproximadamente 40% em média em relação aos tratamentos realizados. Quando comparados os dois tratamentos, a condição E2 atingiu o menor valor de dureza (157 HV), tendo uma diferença de 17 HV para a condição E1 (174HV). Essa diferença de dureza reflete o grau de esferoidização atingido para cada condição de tratamento, como mostrado anteriormente na Figura 6.

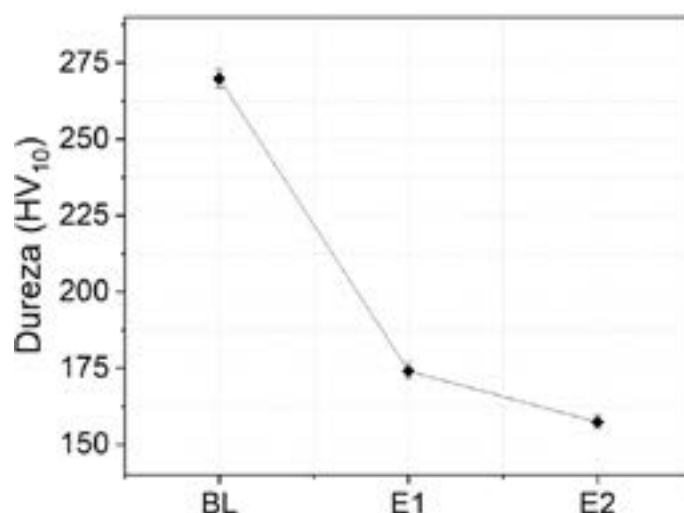


Figura 7 – Medidas de dureza para o aço nas condições BL, E1 e E2.

3.4 SIMULAÇÃO DA CONFORMAÇÃO A FRIO

A utilização de ferramentas de simulação permite prever e acompanhar diversos durante o processo de conformação. Um desses dados é a força necessária para realizar o forjamento a frio. Esses dados são de extrema importância porque são úteis na determinação da capacidade da prensa de forjamento. Assim, mediante a simulação foram estimadas numericamente as cargas de forjamento a frio a partir dos dados experimentais obtidos nos ensaios de tração: A) bruta de laminação: 314 toneladas, B) Tratada E2: 310 toneladas e C) Tratada E1: 313 toneladas. A Figura 8 mostra os resultados comparativos da evolução da carga versus o tempo, e dimensão deformada para as condições de tratamento E1 e E2, assim como na condição de laminado. Observa-se que não houve grande variação da força máxima de conformação para as diferentes condições, contudo, as amostras tratadas termicamente apresentaram forças de conformação relativamente inferiores durante os primeiros instantes de conformação. O fato de as três condições atingirem o máximo da força de conformação na simulação está relacionada à imposição de 86% (6mm de altura) de deformação, o qual é severo para todas as condições e é atingido o limite de encruamento. Segundo a figura 8B, a partir de 7 mm de altura de redução todas as condições atingem o máximo de encruamento.

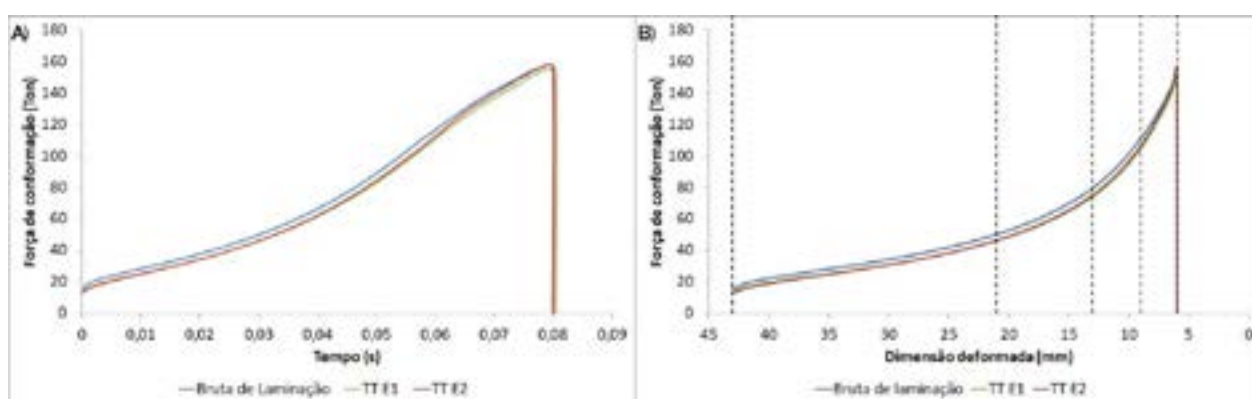


Figura 8 – Gráficos mostrando os resultados da simulação do forjamento a frio do aço 8620 nas condições BL, E1 e E2. a) força em função do tempo, b) força versus dimensão deformada.

Dentro das diferentes opções de análise por simulação, foi obtido resultados em 3D da evolução do dano durante o processo de conformação a frio devido a sua importância no processo considerando a condição de tratamento do aço. Para realizar a comparação da evolução de dano nas diferentes condições de tratamento térmico, foi utilizada a variável denominada “dano”, esta variável indica as regiões sujeitas ao surgimento de dano no processo de conformação. A Figura 9 apresenta imagens comparativas da evolução da variável “dano” para diferentes estágios de deformação para o material nas diferentes condições experimentais: bruto de laminação, esferoidizado E1 e esferoidizado E2.

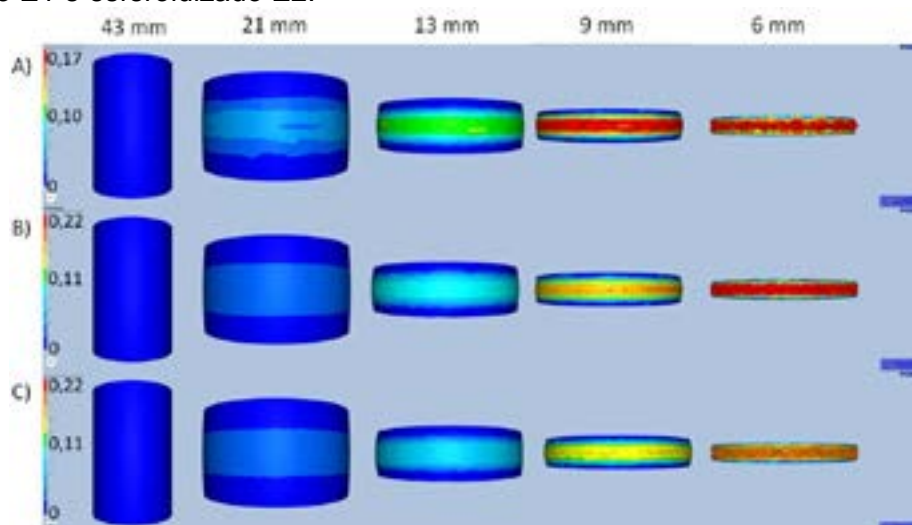


Figura 9 – Evolução da variável “dano” durante estágios do processo de forjamento a frio segundo a simulação numérica. A) Bruto de laminação, B) Condição E1 e C) Condição E2.

A simulação mostra que na amostra bruta de laminação ocorre o surgimento de dano em 9 mm, enquanto para as amostras tratadas termicamente, os primeiros indícios de dano irão surgir apenas quando as amostras atingem 7 mm de espessura; tal comportamento pode ser justificado devido a maior ductilidade das amostras tratadas termicamente, que por sua vez está relacionada com a existência de uma microestrutura esferoidizada nessas amostras.

4. CONCLUSÕES

O presente estudo avaliou a influência do tratamento de esferoidização subcrítico no grau de esferoidização para o aço SAE 8620. Com base nos resultados apresentados, pode-se concluir que:

- Quando comparados os dois tratamentos térmicos em relação ao grau de esferoidização, o tratamento realizado na condição E2 atingiu 40% e a condição E1 20%. Além disso, as partículas de cementita tendem a uma morfologia mais esférica para a condição de maior temperatura E2.
- A dureza do aço tratado tem uma redução de aproximadamente 40% em relação ao aço na condição BL. Sendo que a menor dureza foi obtida no aço para a condição E2.
- A simulação 3D por elementos finitos mostra que a força de conformação diminui quando o material tem o tratamento de esferoidização.
- Nas simulações para um estado de deformação de aproximadamente 80 % (9 mm) o material com o tratamento de esferoidização, E1 e E2, não apresenta dano, sendo que o material BL mostra danos severos.

AGRADECIMENTOS

Pelo financiamento e colaboração no desenvolvimento e execução técnica deste trabalho, os autores agradecem a EMBRAPPII – Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial e a Gerdau Aços Especiais Brasil.

Referências

- [1] Erdal Karadeniz, Influence of different initial microstructure on the process of spheroidization in cold forging, *Materials & Design*, Volume 29, Issue 1, 2008, Pages 251-256.
- [2] O'Brien, J.M., Hosford, W.F. Spheroidization cycles for medium carbon steels. *Metall Mater Trans A* 33, 1255–1261 (2002)
- [3] Erdal Karadeniz, Influence of different initial microstructure on the process of spheroidization in cold forging, *Materials & Design*, Volume 29, Issue 1, 2008, Pages 251-256.
- [4] Ata Kamyabi-Gol, Meisam Sheikh-Amiri, Spheroidizing Kinetics and Optimization of Heat Treatment Parameters in CK60 Steel Using Taguchi Robust Design, *Journal of Iron and Steel Research, International*, Volume 17, Issue 4, 2010, Pages 45-52.
- [5] NO, R. E. Modelagem matemática de curvas tensão-deformação. Diss. de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, UFMG, 2008.
- [6] YANAGIDA, A., YANAGIMOTO, J. *A novel approach to determine the kinetics for dynamic recrystallization by using the flow curve*. *J. Mater. Process. Technol.*, 2004, 151, 33-38.
- [7] O'Brien, J., Hosford, W. Spheroidization of medium-carbon steels. *J. of Materi Eng and Perform* 6, 69–72 (1997)
- [8] Hernandez-Silva, David, and Morales RD. "The spheroidization of cementite in a medium carbon steel by means of subcritical and intercritical annealing." *ISIJ international* 32.12 (1992): 1297-1305.
- [9] Arruabarrena, J.; Rodriguez-Ibabe, J.M. Enhancement of the AISI 5140 Cold Heading Wire Steel Spheroidization by Adequate Control of the Initial As-Rolled Microstructure. *Metals*, 2021, 11, 219.
- [10] Shankar, G., Singh, V.K., Chepuri, A. et al. Influence of Pre-strain on the Cementite Spheroidization of 22MnB5 Steel and Its Effect on Mechanical Properties. *J. of Materi Eng and Perform* 31, 7484–7500 (2022).
- [11] J. Moon, H. Jeong, J. Lee and C. Lee, Particle Coarsening Kinetics Considering Critical Particle Size in the Presence of Multiple Particles in the Heat-Affected Zone of a Weld, *Mater. Sci. Eng. A*, 2008, 483–484, p 633–636.



42º SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil

O Monitoramento do Processo de Forjamento para a Indústria 4.0

*Eng. João Batista GRAEF
SouthWind International*

Desde o início da segunda década deste século, quando ocorreram as primeiras iniciativas para a digitalização dos processos industriais na busca de melhorar a produtividade através de fábricas inteligentes, a chamada **Indústria 4.0**, tem se tornado uma tendência irreversível e no setor da indústria de forjamento no Brasil e no mundo, embora em nosso país ainda esteja muito aquém do estágio já alcançado pelos chamados países industrializados. Mas embora em uma velocidade menor a implantação das tecnologias da fábrica inteligente não é diferente dos países mais avançados e está já se mostrando como um processo irreversível, que tem início no monitoramento do processo de fabricação nas áreas de produção.

As modernas tecnologias oferecem atualmente uma nova fábrica inteligente com soluções integradas por meio de avançados processos de monitoramento e controle, incluindo MES, APS e IA, sistemas estes baseados em pesquisas contínuas e desenvolvimento de tecnologias inovadoras.

As soluções desenvolvidas por várias empresas mundialmente e adotadas pela indústria tornaram-se soluções no presente e uma tendência irreversível para o futuro.

Mas afinal, sempre nos perguntamos, o que é uma fábrica inteligente?

A fábrica inteligente é uma fábrica aplicada com tecnologia da Informação e Comunicação para combinar o digital com os processos de manufatura, resultando em soluções de automação digital com todos os processos de produção integrados desde suprimento, fabricação, logística e distribuição para aumentar a produtividade, qualidade e satisfação do cliente, mantendo o controle em tempo real de todo o processo.

Atualmente, a fábrica inteligente tornou-se essencial para a competitividade global das empresas e em resposta à essas tendências e demandas estão sendo criadas as fábricas inteligentes dinâmicas, chamadas de ideais e otimizadas.

A solução encontrada para as fábricas inteligentes dinâmicas foi a inovação, com base na conexão orgânica entre humanos, máquinas, processo e TI.

Na indústria de forjamento, tudo se inicia com o *MachineView*, que é um sistema de monitoramento do processo em tempo real, que mede a quantidade de força física aplicada pela prensa durante o processo de conformação para, em sequência, analisar e comparar os padrões e em caso de defeitos parar a máquina e informar ao operador para evitar defeitos em série.



Sistema de Monitoramento

MV880

O MachineView™ MV880 garante produtividade e qualidade ao aprimorar a conveniência do usuário junto com um poderoso desempenho de monitoramento.

- 1 Os defeitos são detectados otimizando de acordo com as mudanças em tempo real por meio do aprendizado com auxílio de IA.
- 2 Aprimoramento por meio de funções essenciais, aumentando a vida útil da ferramenta e detecção de defeitos e operação autônoma.
- 3 Pode ser conectado ao sistema MES/POP para uma fábrica inteligente e fornece feedback coletando/analizando os dados de monitoramento.

Essencialmente, o algoritmo IA original do *MachineView* analisa os padrões de sinal em detalhes. Quando detecta um sinal diferente daqueles conforme os padrões estabelecidos no funcionamento normal da máquina em produção, mesmo dentro da faixa de tolerância permitida da força de conformação, considera tais padrões como defeituosos.

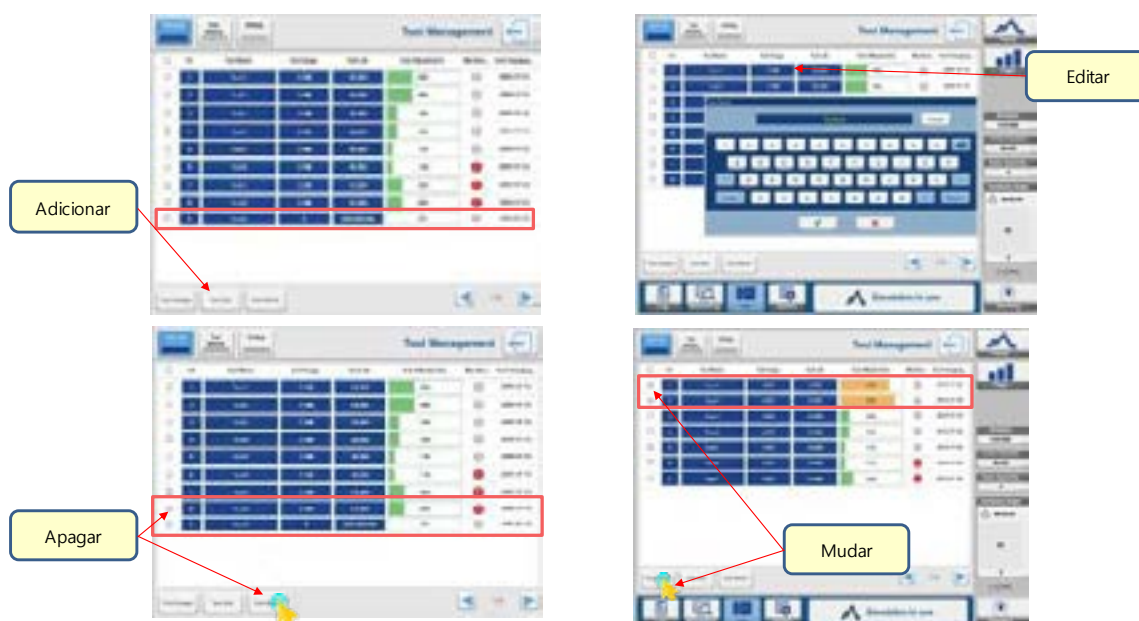
Isso permite maior taxa de detecção de defeitos e maior produtividade para economizar no custo de produção, evitando a fabricação de peças defeituosas e eventuais quebras desnecessárias de ferramentas.

O *MachineView* aprende com IA a condição mecânica de conformação e em conexão com medições digitais variadas, atua no gerenciamento da vida útil das ferramentas e na qualidade de conformação do produto.

O sistema de monitoramento e gerenciamento da vida útil dos ferramentais do *MachineView*, opera com a contagem de produção individualizada para cada uma das ferramentas que compõem o ferramental como um todo e que entram em contato diretamente com a peça forjada podendo ser configurado com os dados salvos com as informações dos históricos de vida útil, ponto de troca, e alertas de proximidade do final da vida útil, sendo restabelecido na próxima entrada em máquina do mesmo produto a ser fabricado.

Com o gerenciamento de cada item do ferramental torna-se possível obter automaticamente e em tempo real, o controle individualizado de cada item do ferramental, que pode ser compartilhado on-line, com os demais sistemas integrantes do *FactoryView*, permitindo assim importantes reduções de custo, através do gerenciamento adequado do consumo de ferramentas.

Gerenciamento da vida útil da ferramenta, uso e histórico de troca para cada etapa do processo. Recuperando automaticamente quando o produto é selecionado novamente



O POP (*Point of Production*) é o agregador de dados em tempo real da linha de produção da fábrica.

O *ProcessView* é um ponto do sistema de produção que gerencia as informações da produção de cada máquina de fabricação em tempo real. Ele fornece todas as informações essenciais necessárias para o gerenciamento da produção. O *ProcessView* reduz os custos de fabricação, aumenta a produtividade e melhora a qualidade do gerenciando as informações, com base em dados rápidos, adequados e precisos.

Especialmente, o *ProcessView* pode ser ofertado a um preço bastante competitivo, escolhendo-se as opções essenciais, para um menor custo de introdução ao monitoramento on-line em fábricas que pretendem iniciar a implantação.

O *ProcessView* também pode trabalhar com integrado ao *MachineView* para coletar e gerenciar os dados de força de conformação e consumo de ferramentas de cada prensa. Pode ser configurado estendendo a conexão com o *FactoryView*, enquanto mantém os dados existentes, armazenados e disponíveis para consulta a qualquer tempo.

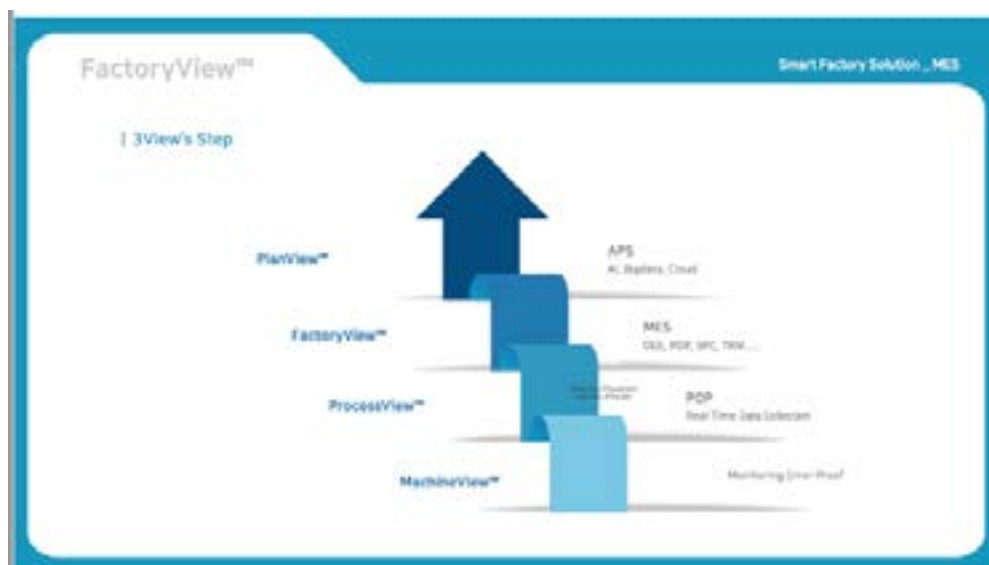
A coleta de dados em tempo real, notadamente da força de conformação e o seu gerenciamento através do *ProcessView* leva à redução de custos do processo de forjamento.

A identificação das diversas situações e intercorrências no local de fabricação em tempo real, limitações e outras variáveis para derivar os esquemas otimizados, permite obter maior produtividade na automação industrial e a consequente economia de recursos na redução de custos, através das seguintes etapas.

1. Estabelecimento de plano de garantia de recursos produtivos.
2. Análise de Indicador Chave de Desempenho de cada etapa do processo.

3. Estabelecimento / alteração do plano de produção.
4. Programação em capacidade finita / condições de gargalo.

O sistema de execução de manufatura para melhoria de produtividade e redução de custos integrado a produção, através do *FactoryView* que é um sistema de coleta de dados para análise e gerenciamento integrado das informações de fabricação, é uma competência chave no ambiente da **Indústria 4.0**.



O *FactoryView* usa as informações de alta tecnologia e tecnologias de comunicação para coletar e analisar os dados de produção em tempo real tempo e apresentar os resultados rápidos, a partir dos dados coletados. Ele também executa os processos da fabricação geral incluindo gerenciamento de produção, gerenciamento de qualidade, gerenciamento de ferramentais e automação nos locais de fabricação. Exibição da fábrica organicamente, além suportar o hardware original da **3VIEW**, essencial para a fábrica inteligente estabelecer o MÊS, otimizado para o ambiente do cliente, através de;

1. Coleta de dados em tempo real.
2. Envio para fabricação de pedidos em uma passagem.
3. Rastreamento de lotes de fabricação.
4. Sistema interligado.

O principal objetivo deste processo, deve ser a continua utilização de tecnologias inovadoras para liderar o estabelecimento e implementação das fábricas inteligentes, com mais eficiência e continuar a pesquisa e o desenvolvimento nos próximos campos importantes da **Indústria 4.0**, incluindo APS, RPA e SCM.



A escolha do melhor parceiro de soluções de TI, para aumentar o valor da qualidade dos produtos e serviços, através de fábricas inteligentes, deve ser baseada a partir de três aspectos em três dimensões; oferecer a melhor solução para os clientes, garantir que os resultados esperados aconteçam na prática e implementar a padronização dos processos, através da capacitação dos usuários dos sistemas.

Mais informações sobre a implementação de fábricas inteligentes podem ser obtidas através do link abaixo;

https://en.e3view.com/?page_id=568&ckattempt=2

E-mail: swind@southwind.com.br



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil
26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

EFFECT OF RECRYSTALLIZATION TIME ON THE MECHANICAL PROPERTIES, MICROSTRUCTURE AND PRECIPITATION OF CARBIDES IN PRESSED LOW CARBON STEEL

Cássio Aurélio Suski ⁽¹⁾
César Edil da Costa ⁽²⁾
Julio Cesar Giubilei Milan ⁽³⁾

ABSTRACT

This paper studied the effect of recrystallization time on mechanical properties, microstructure and carbide precipitation in cold pressed steel. SAE 1020 steel was cold formed at 40%, annealed at 900 °C with soaking times of 10 to 60 minutes and the chemical composition, mechanical properties, grain size, precipitation and pearlitic interlamellar spacing were measured. Hardness, tensile strength and yield strength showed a reduction for soaking times from 10 to 40 minutes and a consequent increase to 50 and 60 minutes. Ductility and impact strength decreased between 40 and 60 minutes. Microstructural analysis identified growth in grain size with increased soaking time due to recrystallization, but also observed precipitation of cementite at soaking times of 50 and 60 minutes, reduction of pearlitic interlamellar spacing, increase of steel tensile properties and hardening. by precipitation in 60 minutes of soaking time.

Key words: recrystallization; mechanical properties, interlamellar spacing pearlitic; soaking time; cold forming.

⁽¹⁾ Prof. Dr., Federal Institute of Santa Catarina, cassio.suski@ifsc.edu.br.

⁽²⁾ Prof. Dr.; State University of Santa Catarina, Brazil, cesar.edil@udesc.br.

⁽³⁾ Prof. Dr.; State University of Santa Catarina, Brazil, julio.milan@udesc.br.

1. INTRODUCTION

Forming processes change the geometry of the material (plastic deformation) through tools and equipment that apply forces to the material. There are several factors that influence the characteristics of shaped parts. Among these factors, one can mention the chemical composition and metallurgical structure (nature, size, shape and distribution of the phases present) of the materials used; the type, degree and speed of deformation applied and the temperature to which the material was subjected before conformation.

There are hundreds of mechanical forming processes and these can be classified by the type of stress of material deformation, by the thickness variation of the formed part, by the operation regime and by the purpose of the deformation.

Among these processes, one of the most commonly found is the repression, which consists of the direct compression of the material between a pair of face tools, generally flat or concave, in order to reduce the height and increase the cross-section of the part. Upsetting is also widely used to form the intermediate stages of manufacturing shaped parts, such as screw heads, nails, valves, etc. The raw material is cut from bars or wires and the upsetting process can occur in one or more stages, and can be carried out cold, warm or hot. In addition, it is very important for the theoretical study of forming processes and for testing materials (SUSKI, 2014).

The product resulting from the pressing process presents alterations in the microstructure and in the mechanical properties. It can be stated that tensile strength and hardness increase during plastic deformation, while ductility is reduced. The movement of dislocations and the generation of additional dislocation within the structure of the material generate structural hardening, which is known as strain hardening and is usually accompanied by reduced ductility of the material. The strain hardening effect renders the distorted and displaced structure resulting from the cold forming of the metal unstable. (PHELIPPEAU et al., 2006).

In order to eliminate these defects and change the mechanical properties of the material, full annealing heat treatment is used. In this treatment, the deformed material is heated at temperatures above the total recrystallization temperature, where the carbon must go into solid solution in the austenite phase (total austenitization of the grains), after which the material is cooled in the furnace for full annealing to occur.

During the annealing process there is a loss of part of the stored energy and a consequent change in the microstructure of the material. This release of stored energy provides the driving force for recovery and recrystallization of the material, but it is the nature of the microstructure that establishes the control of nucleation and growth of the recrystallized grains, as well as their orientation (HUMPHREYS, HATHERLY, 2004).

In recovery, stress relief occurs through the rearrangement of dislocations, without altering the microstructure of the metal. During recrystallization, the structure undergoes modification, depending on the temperature at which the material is heated, with elimination of all tension still present and a decrease in dislocations. Thus, it is observed that with the increase in temperature, there is a reduction in mechanical strength and hardness and an increase in ductility, in this stage all hardening effects are eliminated.

Recrystallization occurs by the movement of existing grain boundaries in the metal structure that move towards the interior of the neighboring grain, forming a deformation-free and recrystallized nucleus; or by the coalescence of subgrains that grow in regions where the internal energy is higher (as in grain boundaries, twin boundaries and inclusions or second-phase particles) forming new grain boundaries. The recrystallized grains begin to grow until they reach a temperature gradient on cooling (BARBOSA et al., 2004).

In grain growth, larger grains grow at the expense of smaller grains that disappear. This happens to reduce the total area of grain boundaries, therefore reducing the mechanical energy associated with them. The longer the time at higher temperatures, the larger the average grain size will be (BARBOSA et al., 2004).

Heat treatment for mild steel is used to change the microstructure and mechanical properties of

the steel. These properties include hardness, tensile strength, yield strength, toughness, ductility and impact strength (BROOME, 1997; KIM et al., 2009).

The annealing of cold-formed steels has been the subject of investigations (SONG, RETTEMAYR, 2002; LEE et al., 2009; RAJI, OLUWOLE, 2012, GHIABAKLOO, KAZEMINEZHAD, 2017; KANG et al., 2010; ANDRADE, 2010; FANG, 2011; RUIZ-APARICIO, 2004; PEREIRA et al., 2017). These studies have been concerned with the resulting mechanical properties, recrystallization kinetics, microstructure and texture development, and the individual and combined effects of composition, thermal history before cold deformation, and heating rates during subsequent annealing. Time was considered an important parameter in changing mechanical properties in most of these studies.

During annealing, grain growth may occur, which may reduce the mechanical strength of low carbon steels and, on the other hand, precipitation hardening may occur.

Precipitation hardening consists of the formation of extremely small, uniformly dispersed particles of a second phase within the matrix of the original phase, which consequently increases the mechanical strength and hardness of some metallic alloys. These small particles of a new phase are called precipitates (DIETER, 2000).

For precipitation hardening to occur, the second phase must be soluble at high temperature and this solubility must decrease with decreasing temperature (ANDRADE, 2010).

Precipitation hardening causes a significant increase in the strength of the steel, and this increase observed in the increase in the yield strength will depend on the coherence of the particles, distribution, size, shape and volumetric fraction (DIETER, 2000).

During annealing, second-phase particles may precipitate, in which case their distribution is often related to the displacement structure, or they may be present prior to deformation of the material, in which case they are often fairly uniformly distributed in the microstructure.

These precipitates will have a different effect on material properties depending on the temperature and processing stage at which they form, or more specifically, the austenite recrystallization temperature, the temperature at which the transformation takes place, as well as characteristics such as particle spacing, size and volume fraction (RUIZ-APARICIO, 2004).

The interlamellar spacing, which represents the distance between adjacent cementite lamellae and the average thickness of the cementite lamellae, are two parameters widely used to correlate the microstructure of the material with the mechanical properties and with deformation and heat treatment stages (ELWAZRI et al., 2005).

Duarte et al. (2014) observed in their study the tendency of reduction of both parameters with the increase of the plateau time in full annealing. According to the work by Wu (2011), the interlamellar spacing of an annealed and then cooled pearlitic steel is inversely proportional to the cooling rate. The reduction in the interlamellar spacing with the increase in the cooling rate occurs due to the reduction in the time that the material has to transform from austenite to pearlite and ferrite through the diffusion mechanism, in this way, the rapid cooling to which the samples were subjected. submitted is responsible for the refinement of the microstructure.

The results of a study of the effect of full annealing on the mechanical properties of cold-formed low carbon steel are presented by Raji and Oluwole (2012). Hardness, yield strength, tensile strength and impact strength reduced with increasing annealing soaking time.

The evolution of the microstructure of a low carbon steel sheet containing 0.05% C, 0.203% Mn and 0.0229% Si (all in % by weight) over a temperature range of 300 to 600 °C after severe plastic deformation using restricted groove pressing technique was studied by authors Ghiabakloo and Kazeminezhad (2017). Through electronic and optical microscopy, grain growth and deterioration in strength and hardness were observed in longer soaking times.

Grain growth and carbide precipitation were studied by Kang et al. (2010). The authors observed that the growth rate of recrystallized grains increased from 840 °C onwards and Rockwell hardness reduced significantly between 800 and 900 °C, which shows good agreement with the equilibrium

temperature of dissolution of the M₃C carbides. An increase in tensile strength occurred between 700 and 800 °C due to precipitation hardening of carbides.

Pereira et al. (2017) in their study on the effect of annealing heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 2.25Cr-1Mo ferritic steel, austenitized the steel in an argon atmosphere for 2 h at 950 °C and cooled in the furnace, identifying an increase in size of grain. In the hot tensile test, temperatures of 25, 500, 600, and 700 °C were used. The sample tested at 25 °C showed clear yielding at approximately 360 MPa, while the sample tested at 700 °C showed a lower yield stress and a lower resistance limit, since precipitation in this case did not promote enough hardening to increase the strength of the steel. In the samples tested at 500 and 600 °C, precipitation hardening was more active in the material resistance.

Therefore, not only the recrystallized grain size, but also the carbides are important variables in studies of the microstructure and mechanical properties of low-carbon steels, and this article intends to study the effect of the full annealing stage time on the mechanical properties, on the microstructure and in the precipitation of cold pressed low carbon steel carbides.

2. METHODOLOGY

In this study, a commercially available cold drawn SAE 1020 low carbon steel with a diameter of 8 mm was selected. Figure 1(a) shows the microstructure of the material as received. The chemical composition analysis was performed (table 1) of low carbon steel in Optical Emission Spectrometer – SPECTROMAXx M – SPECTRO and samples of carbon steel without forming, with 40% forming and without annealing, and with 40% forming and annealing in a muffle furnace at a temperature of 900 °C, with soaking times of 10, 20, 30, 40, 50 and 60 minutes.

Table 1. Chemical composition of SAE 1020 low carbon steel (wt %).

C %	Mn%	Si %	P %	S %	Al %	Cr %	Cu %	Ni %	Mo %	Co %	B %	Ti %	Sn %	V %
0.2	0.49	0.09	0.021	0.016	0.009	0.03	0.01	0.005	0.005	0.05	0.0016	0.003	0.006	0.005

The conformation was carried out in a 45-ton hydraulic press in order to obtain a 40% reduction. Figure 1 (b) shows the microstructure of the material repressed at 40%.

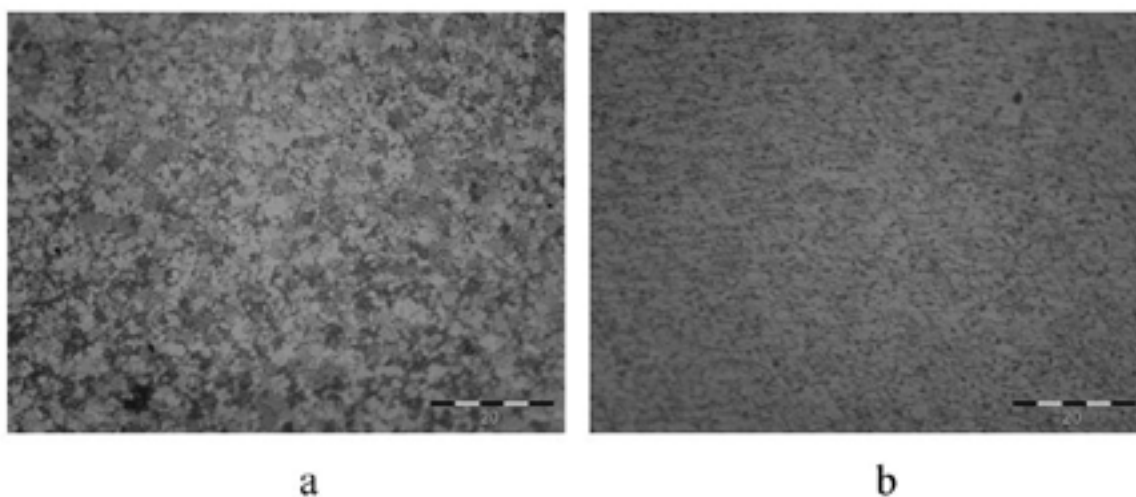


Figure 1. Microstructure of the material as received (a) and repressed 40% (b).

A muffle furnace, JUNG, Model - LF2313 with a temperature range up to 1200 °C was used for the annealing process. All samples were cooled in the furnace to room temperature and were then removed for testing.

For each condition, hardness, tensile, impact and microscopy tests were performed, totalizing 88 samples.

Hardness was measured using a Rockwell B Digimes durometer and 1/16 "hardened steel ball, tensile was performed at room temperature on a 10 kN universal Quanteq testing machine, the impact was performed on a Time Group Model - impact machine JBW300A I / C 300 Joules and

microscopy was performed using an Olympus BX53MHFU optical microscope and Field Emission JEOL scanning electron microscope, model JSM-6701F.

Optical microscopy was performed to evaluate the ASTM grain size and scanning electron microscopy verify the amounts of precipitates and the pearlitic interlamellar spacing.

The pearlitic interlamellar spacing was determined by the random intersection method in three different regions for each test condition. A line was drawn over the pearlite with less interlamellar spacing, dividing the total size of the line by the number of intersections with the cementite lamellae and obtaining the average interlamellar spacing (S_0) of the pearlite using equation 1.

$$S_0 = \frac{L_T}{I} \quad (1)$$

Where L_T is the total length of the intersection line drawn in μm and I is the number of intersections of the line with the cementite lamellae.

RESULTS

Figure 2 shows the effect of soaking time on the hardness of 40% cold-formed low carbon steel subjected to an annealing treatment at 900 °C. A decreasing trend is observed with the increase in the soaking time, with a sharp drop in the value between 30 and 40 minutes, where from that time onwards there is an increase in the steel hardness.

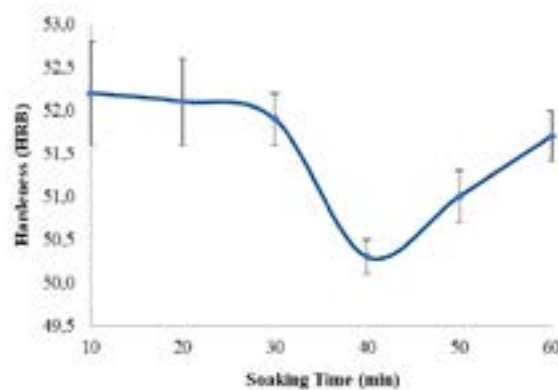


Figure 2. Hardness variation of cold-formed 40% annealed low-carbon steel 900°C.

Figure 3 shows the effect of holding time on the tensile strength of 40% cold-formed steel subjected to an annealing treatment at 900 °C. A decreasing trend is observed with the increase in the soaking time, with a sharp drop in the value between 30 and 40 minutes, where from that time onwards there is an increase in the tensile strength of the steel.

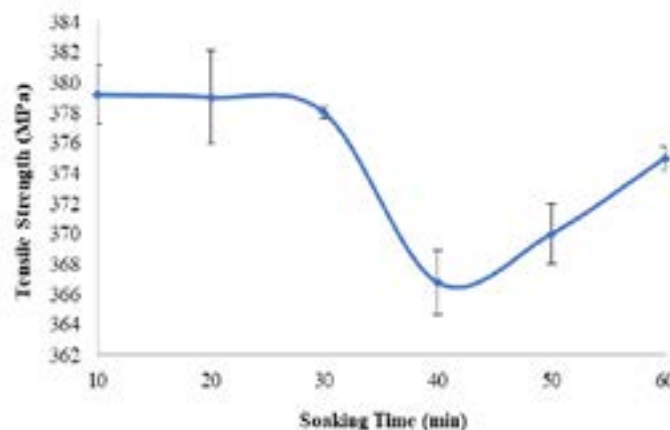


Figure 3. Influence of soaking time on tensile strength of 40% cold-formed low-carbon steel annealed at 900 °C.

Figure 4 shows the effect of holding time on the yield strength of 40% cold-formed steel subjected to an annealing treatment at 900 °C. A decreasing trend is observed with the increase in the soaking time, with a sharp drop in the value between 30 and 40 minutes, where from that time onwards there is an increase in the yield strength of the steel.

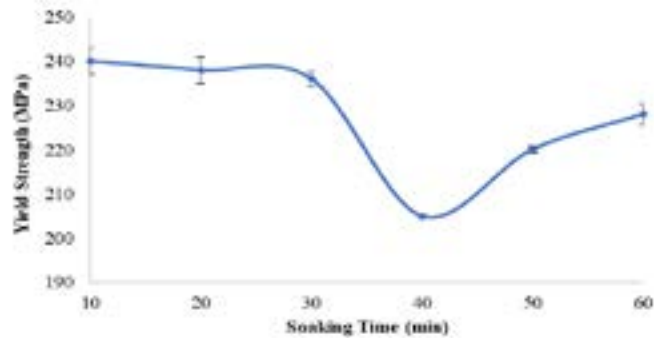


Figure 4. Influence of soaking time on yield strength of 40% cold-formed low-carbon steel annealed at 900 °C.

Figure 5 shows the correlation between tensile strength and hardness of 40% cold-formed steel subjected to an annealing treatment at 900 °C. It shows a linear relationship between them, with an increase in hardness as tensile strength increases.

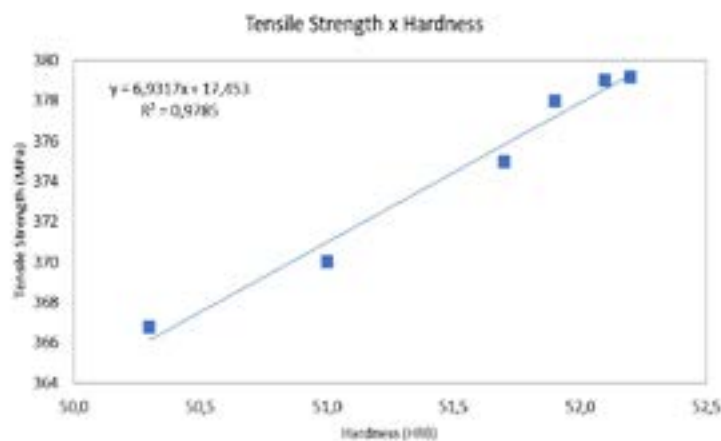


Figure 5. Correlation between tensile strength and hardness of 40% cold-formed steel annealed at 900 °C.

Figure 6 shows the correlation between yield strength and hardness of 40% cold-formed steel subjected to an annealing treatment at 900 °C. It shows a linear relationship between them, with increasing hardness as the yield strength increases.

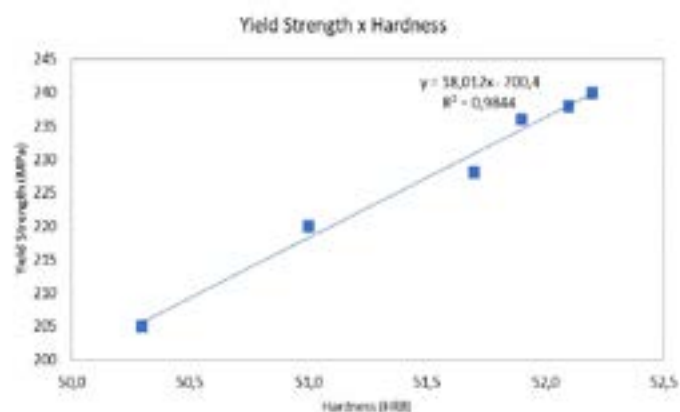


Figure 6. Correlation between yield strength and hardness of 40% cold-formed steel annealed at 900 °C.

Figure 7 shows the correlation between tensile strength and yield strength of 40% cold-formed steel subjected to an annealing treatment at 900 °C. It shows a linear relationship between them, with an increase in tensile strength as the yield strength increases.

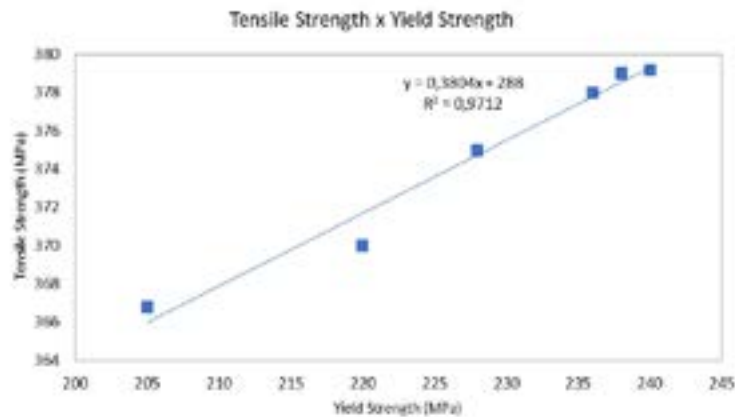


Figure 7. Correlation between tensile strength and yield strength of 40% cold-formed steel annealed at 900 °C.

Figure 8 shows the effect of soaking time on the ductility of 40% cold-formed steel subjected to an annealing treatment at 900 °C. It is observed ductility values with a small reduction with the increase of the plateau time up to 30 minutes, with a small increase in the value between 30 and 40 minutes and, subsequently, a greater decrease between 40 and 60 minutes.

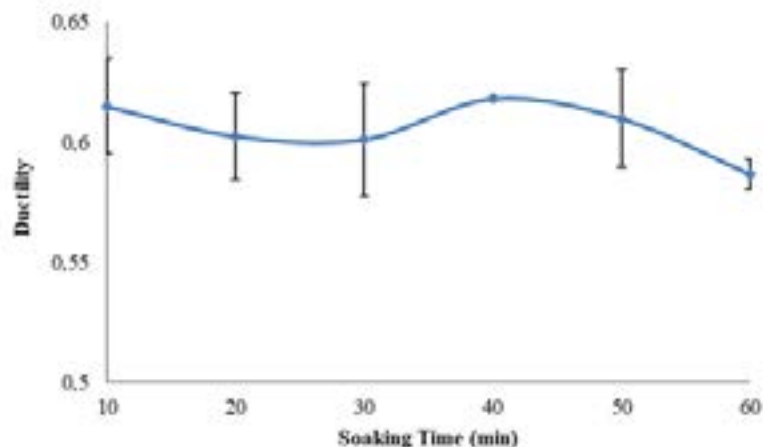


Figure 8. Influence of annealing soaking time on the ductility of 40% cold-formed low-carbon steel annealed at 900 °C.

Figure 9 shows the effect of soaking time on the impact strength of 40% cold-formed steel subjected to an annealing treatment at 900 °C. Practically constant values of resistance to impact are observed with the increase in the plateau time up to 30 minutes, with a representative increase in the value between 30 and 40 minutes and, subsequently, a sharp decrease between 40 and 60 minutes.

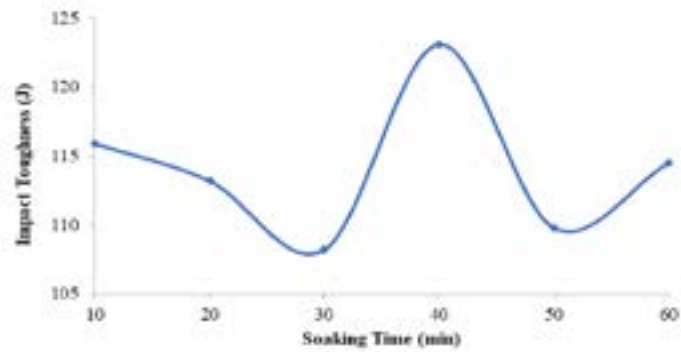


Figure 9. Influence of annealing soaking time on the impact strength of 40% cold-formed low-carbon steel annealed at 900 °C.

Figure 10 shows the cross-sectional optical microscopy of 40% cold-formed steel at different holding times. It shows that for the soaking times of 10 to 40 minutes there was the beginning of recrystallization of the grains, however with a small increase in the grain size and, for the soaking times of 50 and 60 minutes there is a greater growth of the grains, but there is also the appearance of precipitates in these same threshold times, as can be seen in the scanning electron microscopy of figures 11(a) and 11(b).

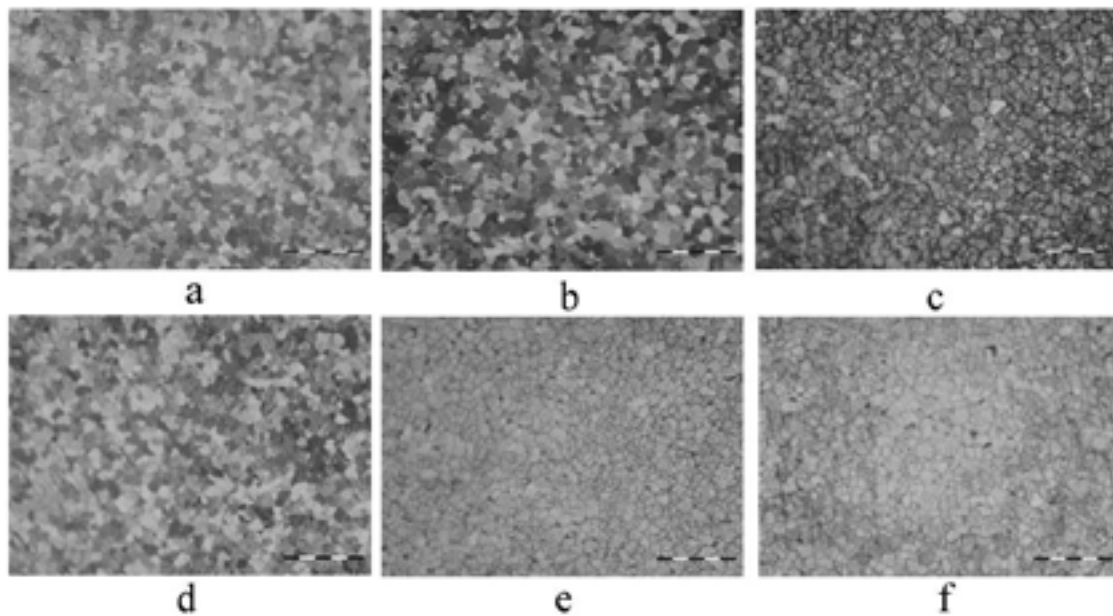


Figure 10. Optical microscopy of cross-section of 40% cold-formed steel annealed at 900 °C, with dwell times of (a) 10, (b) 20, (c) 30, (d) 40, (e) 50 and (f) 60 minutes.

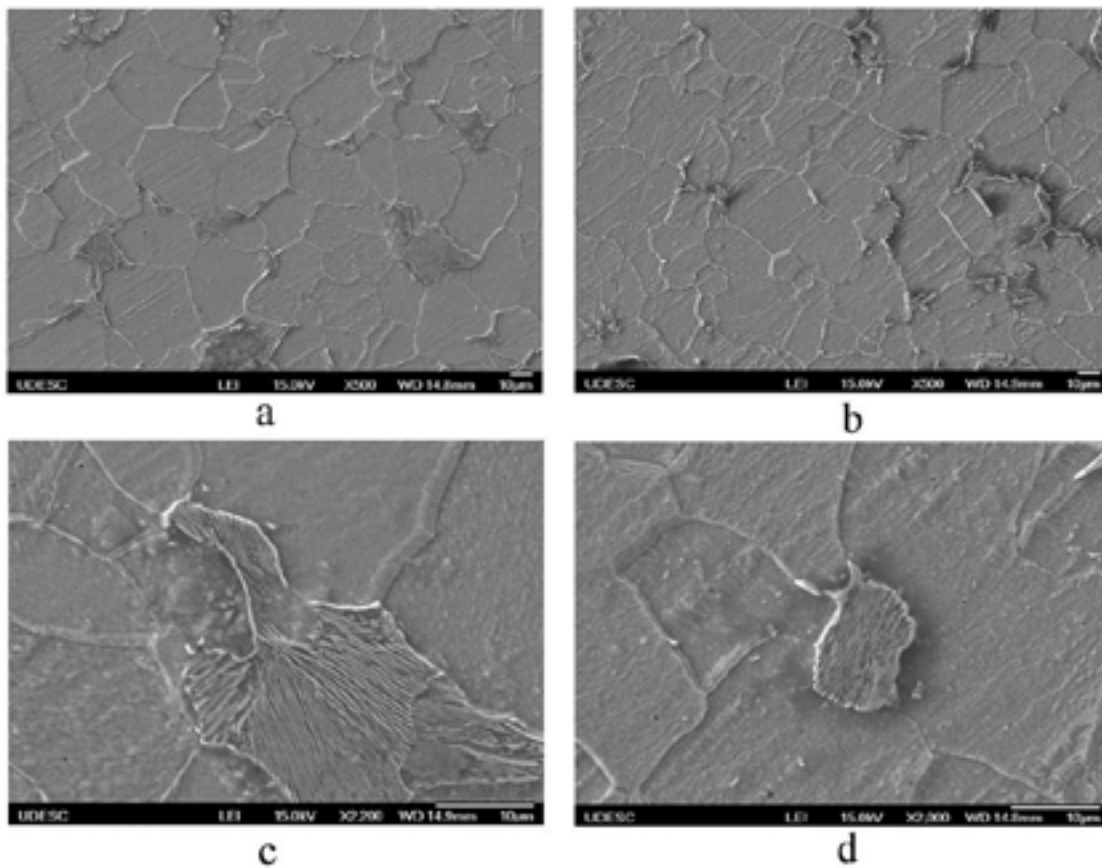


Figure 11. Scanning electron microscopy of cross-section of 40% cold-formed steel annealed at 900 °C, with soaking times of (a) 50 and (b) 60 minutes and interlamellar spacing details pearlitic with holding times of (c) 50 and (d) 60 minutes.

Table 2 shows the interlamellar spacing medium pearlitic for soaking times of 40 to 60 minutes, where a reduction in interlamellar spacing can be seen with increasing soaking time.

Table 2. Interlamellar spacing medium pearlitic.

Soaking time	Medium pearlescent interlamellar spacing (μm)
40 min.	0.60
50 min.	0.52
60 min.	0.34

Figure 12 shows the variation in ASTM grain size with soaking time of 40% cold-formed steel subjected to an annealing treatment at 900 °C. It shows the ASTM grain size growth trend with the increase of the soaking time, accentuating in the times of 50 and 60 minutes.

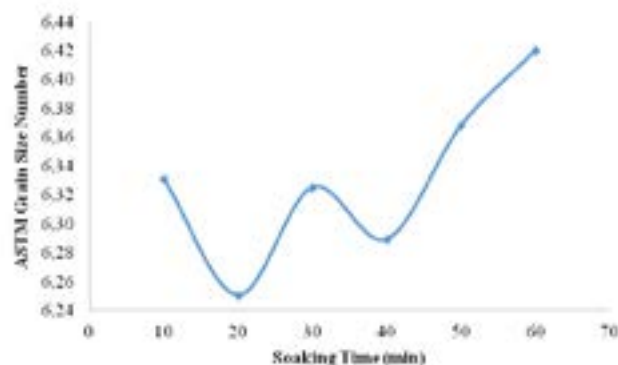


Figure 12. ASTM grain size of 40% cold-formed steel annealed at 900 °C.

DISCUSSION

Based on these results, it can be stated that the hardness, the yield strength and the tensile strength (figures 2, 3 and 4) slowly reduce with the increase in the soaking time between 10 and 30 minutes, probably due to the process of recovery and initiation of recrystallization. A very similar behavior between these properties can be observed, as observed in the correlations of figures 5, 6 and 7.

Steel 1020 belongs to the family of hypoeutectoid steels, which must be heated at least 50 °C above the total recrystallization temperature (Line Ac_3). Below this line, ferrite does not completely transform into austenite. It should be noted that in Ac_3 , full austenitization of the grains is assumed, after which the material is cooled in the furnace so that full annealing takes place. All carbon must go into solid solution in the austenite phase. Thus, it can be stated that the total austenitization of the grains did not occur at low soaking times, showing high hardness, yield strength and tensile strength at 10, 20 and 30 minutes of soaking.

It is observed that, between the times of 30 and 40 minutes, there is a sharp drop in the values of hardness, yield strength and tensile strength. This indicates that the increase in the soaking time causes the beginning of austenitic grain nucleation, that is, there is initial recrystallization, causing a reduction in hardness, yield strength and tensile strength. This grain nucleation can be observed in the micrograph of Figure 10 (c).

After a soaking time of 40 minutes, there is an increase in hardness, yield strength and tensile strength of steel and a decrease in ductility (figure 8) and impact strength (figure 9). Figure 13 shows the variation in tensile strength and ductility of 40% cold-formed steel annealed at 900 °C for the different soaking times studied.

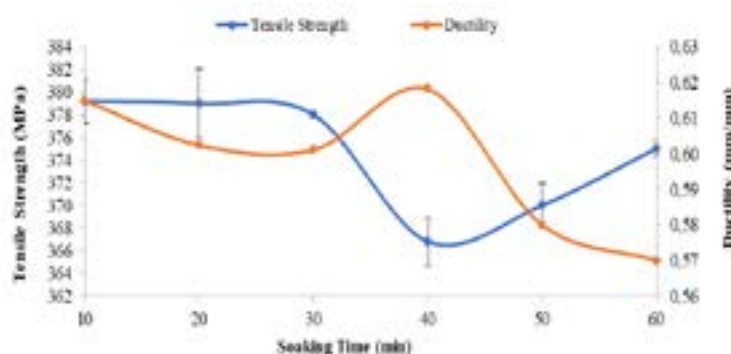


Figure 13. Tensile strength and ductility of 40% cold-formed steel annealed at 900 °C.

The ASTM grain size (figure 12) shows a tendency to increase due to recrystallization resulting, initially, in a decrease in the values of the mentioned properties. On the other hand, the precipitation of iron carbides (cementite) is observed in the plateau times of 50 and 60 minutes (figures 10(e), 10(f), 11(a) and 11(b)), which results in an increase in the hardness, yield strength and tensile strength of the steel, that is, precipitation hardening occurs.

Sun et al. (2014) also observed that the tensile strength of annealed low carbon steel increases due to precipitation hardening, although recrystallization has occurred and the average grain size has increased. In other words, precipitation hardening compensated for the drop in strength induced by increasing grain size.

In agreement with what was presented in this study, Iker et al. (2007) observed that, for longer soaking times, steel has a higher tensile strength. The tensile strength gain is, however, quite small (100-150 MPa) and this can be attributed to precipitation hardening, as cementite was observed by electron diffraction.

Other authors (KANG et al., 2010; ANDRADE, 2010; FANG, 2011; PEREIRA et al., 2017 and others) also observed precipitation hardening of carbides in low-carbon annealed steels at temperatures similar to that studied. The microstructure and the interlamellar spacing of the pearlite will depend on the temperature, rate and cooling time, which will define the mechanical behavior of the material. For cooling to temperatures slightly below the eutectoid, the longer the start and end time of

the transformation will be. This behavior is directly related to the free energy of the system, in which, for high temperatures, the greater the barrier to achieving stable nucleation. The cooling rate, in turn, will influence how close together the pearlite lamellae will be. The lower the cooling rates, the closer the pearlite grains will be and the smaller the interlayer distance.

According to Kuziak et al. (2019) hardness increases as the interlamellar spacing decreases, or as the fraction of cementite within the pearlite increases. It was observed by the authors that the interlamellar spacing reduced with an increase in the cooling rate from 0.25 to 5°C/s, but between 5 and 10°C/s the interlamellar spacing increased. Fine pearlite, because it has a smaller interlamellar spacing, added to the fact that it has a larger grain boundary area, has greater resistance compared to coarse pearlite, however, it has lower ductility.

Baker et al. (2019) found that the decrease in the interlamellar space of pearlitic steels causes an increase in yield forces at the cost of reducing tensile ductility. This reduction in the interlamellar spacing makes the behavior of the material less ductile, since it makes it difficult for the grains to move when the material is subjected to tension.

In the present study, the grain growth region has interlamellar spacing smaller pearlitic (table 2) and this fact could be justified due to the greater kinetics of transformation in the region of coarse grains, which would shift the transformation curve in continuous cooling and, therefore, the transformation of austenite would occur at lower temperature, that is, with longer soaking times (50 and 60 minutes) there is a greater kinetics of transformation and, consequently, there is formation of fine pearlite.

interlamellar spacing and the larger grain boundary area for the soaking time of 60 minutes compensated the drop in strength induced by the increase of the ASTM grain size of the cold-formed SAE 1020 low carbon steel 40% and resulted in an increase in the tensile strength and a decrease in the ductility of the studied steel.

CONCLUSIONS

Recrystallization annealing at various stepping times was carried out on cold pressed low carbon steel bars in order to investigate the mechanical properties, microstructure evolution and carbide precipitation during annealing, and the following results were obtained:

1. Between the soaking times of 10 and 30 minutes, there is practically no variation in the mechanical properties of the steel, because at these temperatures, the phenomenon of recovery and the beginning of recrystallization probably occurs;
2. A sharp drop in hardness and tensile properties and an increase in impact strength are observed between the soaking times of 30 and 40 minutes, due to the onset of nucleation of austenitic grains, ie, initial recrystallization.
3. Between the times of 40 and 60 minutes there is an increase in hardness and tensile properties and there is a drop in ductility and impact resistance.
4. The ASTM grain size shows an increase with the increase of the soaking time due to recrystallization, however it is observed the precipitation of iron carbides (cementite) in the soaking times of 50 and 60 minutes and reduction of the interlamellar spacing for the time 60 minutes, which results in increased tensile properties of the steel and precipitation hardening.

REFERENCES

1. RLD Andrade. **Influence of the Parameters of the Cold Reduction and Disarmament Cycle on the Mechanical Properties and Microstructure of cold-rolled high-strength, low-alloy steel processed via Continuous Restoration**, Belo Horizonte: UFMG, 2010, p. 73.
2. Baker, M. Wu, Z.O Wang. **The all-other-mass eutectics: A review. Characterization of Materials**, n. 174, p. 545-557, United States, 2019.
3. RP Barbosa, SGS Campos, MA Fonseca. **Recrystallization of Austenitic Stainless Steel / A Statistical Approach**. Unileste, Vol. 2, Ipatinga, Jul/Dec 2004.

4. JB Broome. **Development of a robust heat treatment process for rockwell B scale hardness test blocks**. Master's Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1997.
5. G. AND. Dieter. **Mechanical Metallurgy**. 2nd ed., Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 2000, p. 653.
6. A. W. R. duarte P. Siqueira, F. R. F. Silva, M. fontana S. Mendez, J. F. W. Lins. **Microstructural evolution during thermomechanical processing of pearlescent steel for manufacturing wire rods**. Brazilian Congress of Materials Science and Engineering, 2014.
7. A. Elwazri, P. Wanjara, S. Yue. **The effect of pearlescent microstructural characteristics on the mechanical properties of hypereutectoid steel**. Science and Engineering of Materials A, v.404, p.91 – 98, 2005.
8. W. Stuck. **Annealing and Precipitation Behavior during Batch Annealing of HSLA Steels**, University of Pittsburgh, 2011, p. 147.
9. L. Gao, LX Zhang, J. Gu, XQ Ou, S. Ni, K. Li, Y. Du, M. Song. **Fracture mode transformation of an Al-Mg-Si-Cu web subjected to aging treatment**. Sci. Eng. A 735 (2018) 201-207.
10. H. Ghiabakloo, M. Kazeminezhad. **Fast acting severely deformed low carbon steel in the subcritical temperature range**. I knew. Mater. Int., Vol. 23, ^{No. 5} (2017), pp. 984-993.
11. FJ Humphreys, M. Hatherly, hatherly. **Recrystallization and Related Restoration Phenomena**. 2nd Edition, Elsevier Ltd., Amsterdam, 2004.
12. M. Iker, D. Gaude-Fugarolas Jacques, F. Delannay. **Improvement of Mechanical Properties of High Manganese Steels by Combination of Precipitation Hardening and Mechanical Twinning**. Advanced Materials Research Vols. 15-17 (2007) pp. 852-857.
13. S. Kang, Y. S. jung Jun, Y. K. Lee. **Effect of recrystallization from seclusion temperature on carbide precipitation, microstructure and mechanical properties in Fe-18Mn-0.6C-1.5Al TWIP steel**. Materials Science and Engineering: A, Vol. 527, ^{No. 3}, 2010, pp. 745-751.
14. WJ Kim, HG Jeong, HT O Jeong. **Achieving high strength and high ductility in magnesium alloys using severe plastic deformation combined with low temperature aging**. Scripta Materialia, Vol. 61, ^{No. 11}, 2009, pp. 1040-1043.
15. R. Kuziak, V. Pidvysots'ky, M. Pernach, L. Rauch, T. Zygmunt, T. Pietrzyk, pietrzyk. **Selection of the best phase transformation model for optimizing the manufacturing processes of pearlescent steel rails**. Civil and Mechanical Engineering Archives, n. 19, p. 535-546, Wrocław Poland, 2019.
16. JW Lee, JC Lee, YS Lee, KT Park, WJ No, no, no, no. **Effect of Post-Strain Compensation Conditions on Lamella Cementite Behavior and Occurrence of De-rolling in Cold Drawn Steel Wires**. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, ^{No. 12-13}, 2009, pp. 5300-5304.
17. JC Pereira, VL Sordi, AS Brandim, R. Barbosa, JAS Porto, JFR Sobrinho. **Effect of thermal treatment of compensation on the microstructure and mechanical properties of 2.25Cr-1Mo ferritic steel**. Rev. Bras. Application Vac., Campinas, Vol. 36, No. 3, pp. 152-157, Sep - Dec., 2017.
18. A. Phelippeau, S. Pommier, T. Tsakalakos, M. Clavel, C. O Prioul. **Cold-drawn steel wires — processing, residual stress and ductility — Part I: Metallographic and finite element analyzes**. Fatigue Fracture Engineering Material Structure, Vol. 29, ^{No. 3}, 2006, pp. 243-253.
19. NA Raji, OO Oluwole. **Effect of soaking time on the mechanical properties of cold reworked low carbon steel**. Materials Science and Applications, 2012, 3, pp. 513-518.

20. Ruiz-Aparicio. **Evolution of the Microstructure in Microworld Bearing Steels of NB Produced by the Compact Strip Production Process.** University of Pittsburgh, 2004, p. 162.
21. M. Music, X. Li, KH Chen. **Modeling the age hardening behavior of SiC/Al metal matrix composites.** Metall. Mater. Trans. 38 (2007) 638-648.
22. X. Song, V. Rettemayr. **Modeling Study on Recrystallization, Recovery and Its Temperature Dependence on Inhomogeneously Deformed Materials.** Material Science in Engineering: A, Vol. 332, No. 1-2, 2002, pp. 153-160.
23. LX Sun Tao, M. Kuntz, JQ Yu, K. Lu, what's to be done. **Annealing-induced hardening of a low-carbon nanostructured steel prepared using dynamic plastic deformation.** J. Mater. Sci. Technol., 2014, 30(8), 731 – 735.
24. HERE The Suski. **Multistage mechanical training.** IFSC Publisher, Florianópolis – SC, 2014.
25. M. Wu, L. Hua, Y. Shao, Q. Zhou. **Influence of compensation cooling rate on microstructure evolution and deformation behavior in medium steel cold ring bearing.** Materials and Design, v.32, p.2292 – 2300, 2011.



42º SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDR

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis

1ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura

Use of ELTA / 2DELTA program for analysis and design of a forging line based on thermal and productivity specification.

Uso do programa ELTA / 2DELTA para análise e projeto de uma linha de forjamento com base na especificação térmica e de produtividade.

José Carlos Zerbini ⁽¹⁾
Tomaz Petracco ⁽²⁾
Claudeci Rodrigues ⁽²⁾
Mateus Lima da Silva ⁽²⁾
Paulo Roberto de Carvalho ⁽²⁾
Eduardo Baptistelli ⁽²⁾
Alexander N. Ivanov ⁽³⁾

ABSTRACT

Using of ELTA / 2DELTA programs for analysis and design of a forging line based on thermal and productivity are considered. Inductor line length, inverter frequency and impedance matching were addressed to meet billet heating work program specification.

Comparison of experimental and simulation for cylindrical billet steel work program specification are presented. Special attention was paid to define maximum / minimum productivity for each billet diameter and a setup table was generated and inserted on the machine PLC helping fast start-up and limitation of maximum surface temperature on the heating process. It is a multitask project involving expertise on engineering thermal specification, electrothermal programs, mechanical design, inverter and PLC software specialist.

Key words — induction heating, induction forging line design, ELTA and 2DELTA programs, forging inverter and capacitor bank setup.

⁽¹⁾ Eng., Synergetica Sistemas e Processos, zerbini@synergeticasp.com.br

⁽²⁾ Eng., Tomaz Petracco,

⁽²⁾ Eng., Claudeci Rodrigues,

⁽²⁾ Tec., Mateus Lima da Silva, mateuslima0201@gmail.com

⁽²⁾ Eng. Paulo Roberto de Carvalho, PRC Indução, prcinducao@gmail.com

⁽²⁾ Mec. Designer, Eduardo Baptistelli, ebaptistelli@gmail.com

⁽³⁾ Dr., Saint-Petersburg Electrotechnical University (LETI), Russia; anivanov@etu.ru

Use of ELTA / 2DELTA program for analysis and design of a forging line based on thermal and productivity specification.

1. Introduction

Results of multitask project involving expertise on engineering thermal specifications, electrothermal programs, mechanical design, inverter and PLC specialist are presented. Initially the whole process started as a work program requiring at least 2 set of coil lines due to the billet diameter range.

During the analyses of thermal and productivity with ELTA 7.0 and 2DELTA programs based on the set of arguments to minimize coil line setup, billet to press arrangements and capacitor bank setup it has been established a final work program specification.

At early stage of analysis became clear that frequency modification and some degree of electronic adjusts would be necessary at the inverter power supply.

2. Work program for the project

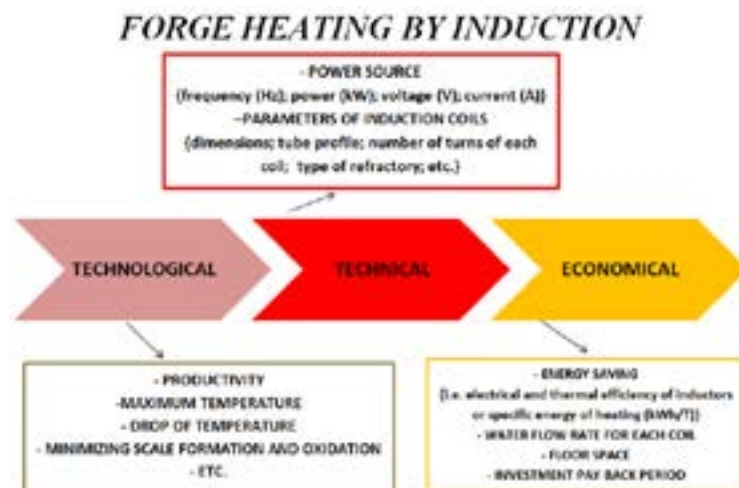
Approach for investigation and design of the new coil line was to get the best energy signature based on the set of restrictions after making the strategic production / engineering decision.

Final work program specification: material reference SAE 4140					
Dia (mm)	146	139,69	133,35	127	114,30
Prod 100% (kg/h)	2700	2700	2700	2700	1800
Prod min (kg/h)	1700	1700	1700	1700	1300
Thermal process @ 1200 to 1250 °C , maximum initial dT 600 °C , maximum exit furnace dT 100 °C					

Original available power supply:

Original power supply characteristics			Furnace	
P (kW)	Umf (V)	F (Hz)	Motion type	Line length (m)
1300	1000	2000	Continuous	4

The main problems to be investigated for forge heating by induction can be divided on three types:

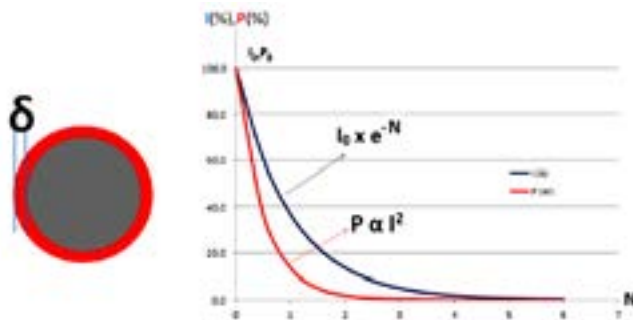


Induction process and coil design involve more complicated phenomena than other heating techniques and are more knowledge demanding than traditional methods.

Electromagnetic and thermal processes in induction installations are mutually related (coupled) and must be simulated as tightly coupled. ELTA and 2DELTA are programs, created on the base of Maxwell and Fourier equations for induction heating simulation.

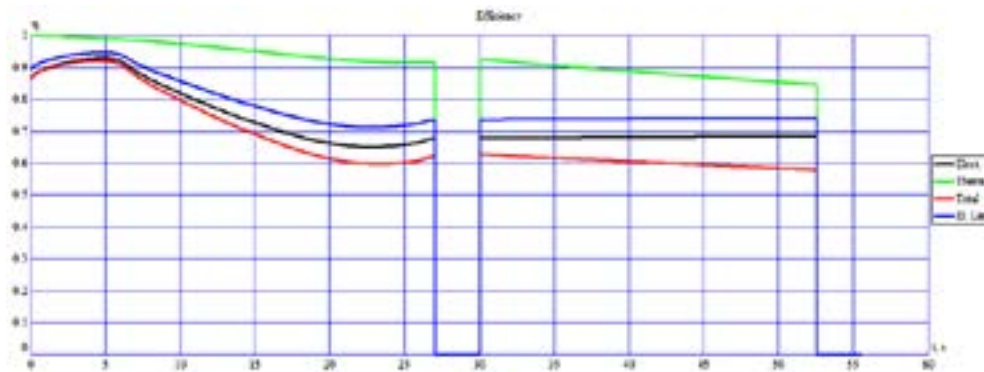
Choice of power source frequency is the most important stage of engineering design. Both a consumption of electric energy and quality of heating depends on it. For example, for through heating in forging process it is essential that electrical efficiency should be close to the maximum value and time of heating should be minimal.

ELTA calculates effective penetration depth δ , i.e. depth from the boundary surface, where the total power absorbed by a workpiece decreases e^2 times and 86 % of total power is absorbed, and the threshold value of electrical efficiency η_{lim} for current geometrical parameters of cross-section (diameters or perimeters of inductor and workpiece) and electrical parameters: resistivity of inductor tube, variable during the heating process resistivity and permeability of work piece materials taken into account infinitely long induction system.



$$\eta_{lim} = \frac{1}{\left(1 + \frac{R_1}{R_2 W^2}\right)}$$

Where: R_1 – minimal resistance of induction coil
 R_2 – real resistance of workpiece
 W – turn number



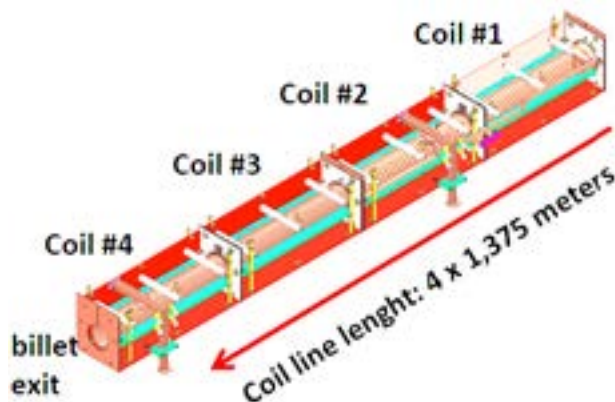
Electrical efficiency should be as close as possible to the maximum value of Electrical limit (η_{lim}) and time of heating should be minimal.

3. New coil line design

After several simulation on ELTA program to meet design restriction, a new frequency range operation (700 Hz to 800 Hz) and coil line length (5,5 meters) based on the available space at the furnace and plant floor were selected.

The necessary change in the power supply frequency will require the adding of capacitance on the existing capacitor bank as well adjusting in the electronic cards.

Inductor coil configuration and number of turns for each coil was selected for the best choice of thermal heating curve and impedance matching at the new frequency operation.



Coil Copper diameter: 212 mm

Refractory diameter: 174 mm

Rack A with coil #1 and coil #2 are connected in series and then to the new capacitor bank.

Rack B with coil #3 and coil #4 also are connected in series and then to the new capacitor bank.

Number of turns for coil #1: 20 ; coil #2: 40 ; coil #3: 40 ; coil #4: 40

3.1 Simulations for cylindrical billet steel work program specification

Attention was paid to define maximum / minimum productivity for each billet diameter.

Final work program simulation: material reference SAE 4140					
Dia (mm)	Prod 100% (kg/h)	Tf avrg (°C)	Initial dTmax (°C)	Exit dT center/sup. (°C)	Prod sim. (kg/h)
146	2700	1238	535	82	2844
139	2700	1242	525	65	2708
133	2700	1245	531	75	3032
127	2700	1230	538	68	2940
114	1800	1218	483	30	2368

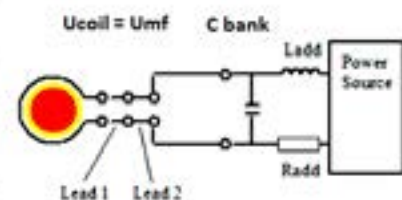
Thermal process @ 1200 to 1250 °C , maximum initial dT 600 °C , maximum exit furnace dT 100 °C

Electrical parameters from simulations for work program specification are presented.

Electrical simulated parameters for Final work program specification					
Dia (mm)	146	139,69	133,35	127	114,30
Prod 100% (kg/h)	2700	2700	2700	2700	1800
Simulated integral parameters					
Cons (kWh/t)	377	383	379	388	408
Prod. Sim. (kg/h)	2844	2708	3032	2940	2368
Pcoil kW)	1072	1036	1147	1140	965
Ucoil (V)	757	791	914	916	934
Icoil rack 1 (A)	3150	3200	3350	3525	3400
Icoil rack 2 (A)	2280	2260	2300	2450	2350
Fcoil (Hz)	700	700	700	700	700
C (microFarad)	1290	1277	1541	1256	1223

Presented simulated integral parameters does not include power losses to the pair of water cooled rails, and power & voltage transmission losses from capacitor bank to coil connection were calculated based on mechanical furnace arrangement.

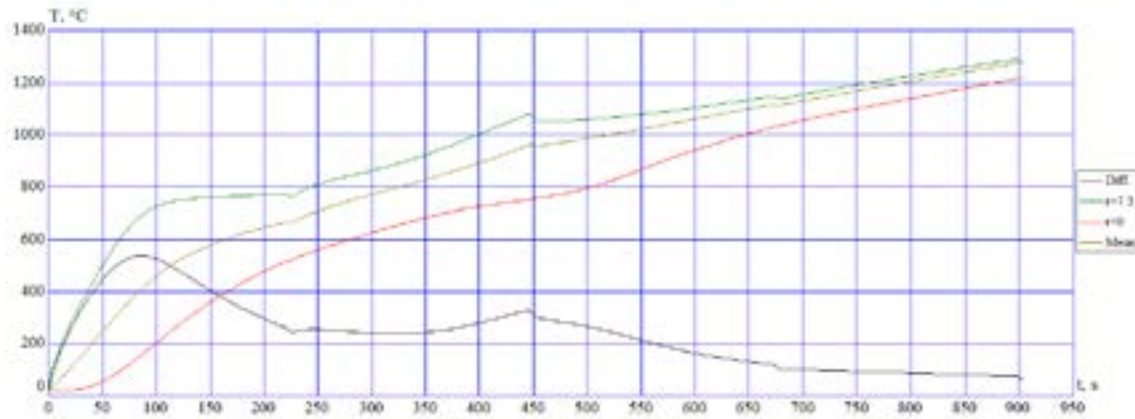
Electrical simulated parameters x existing power supply and capacitor bank					
	P (kW) (100%)	Umf (V) (100%)	I _{mf} (A) (100%)	F (Hz)	Capacitor bank (microFarad)
Existing	1300	1000	1630	2000	1081
	↓	↓	↓	↓	↓
New line	1300	1000	1630	700 to 1000	1518



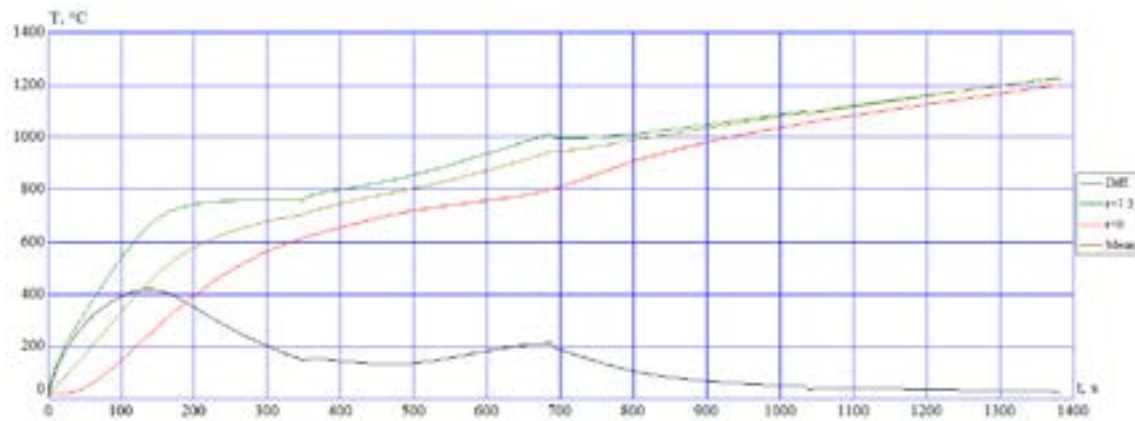
It was required to add capacitor to achieve a total of 1518 microFarad.

3.2 Simulated heating curves for maximum and minimum production

Simulations for dia 146 mm cylindrical billet steel work program specification

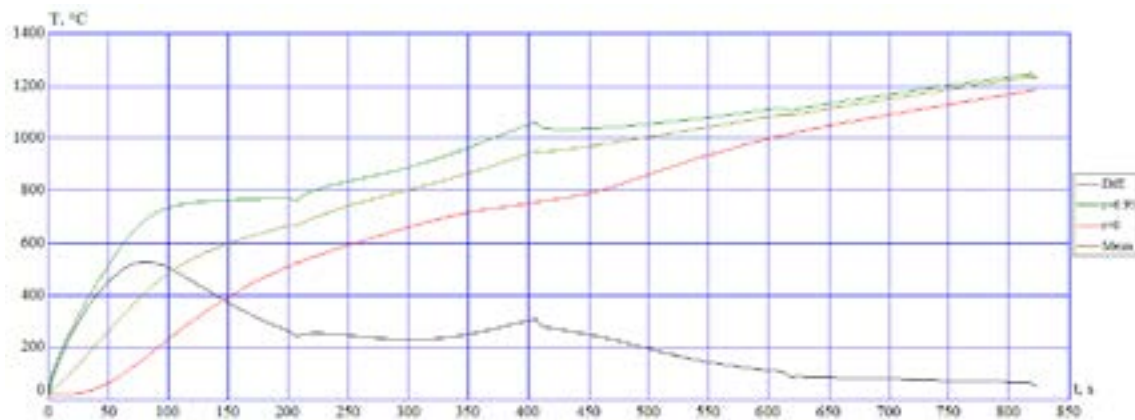


Dia 146 @ 2700 kg/h – dT 535 °C – 1273 °C – dTcs 75 °C

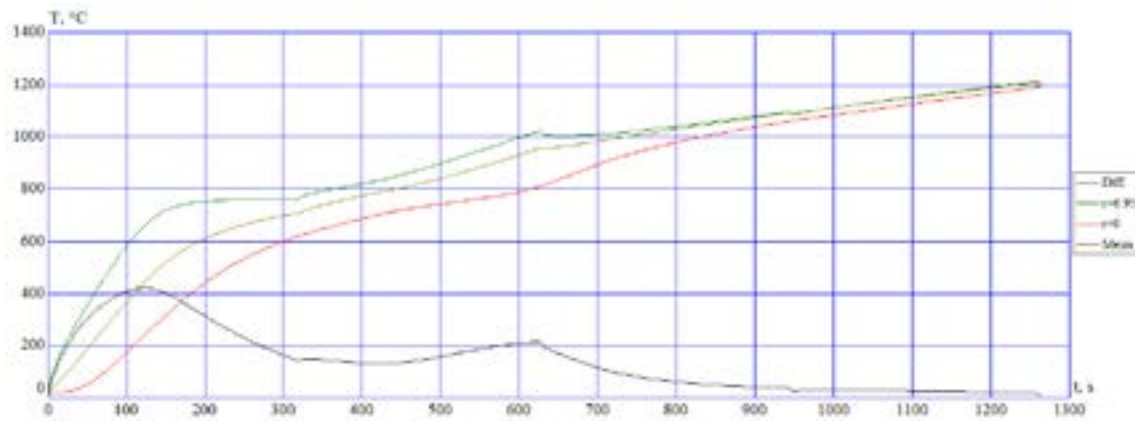


Dia 146 @ 1700 kg/h – dT 415 °C – 1221 °C – dTcs 25 °C

Simulations for dia 139 mm cylindrical billet steel work program specification

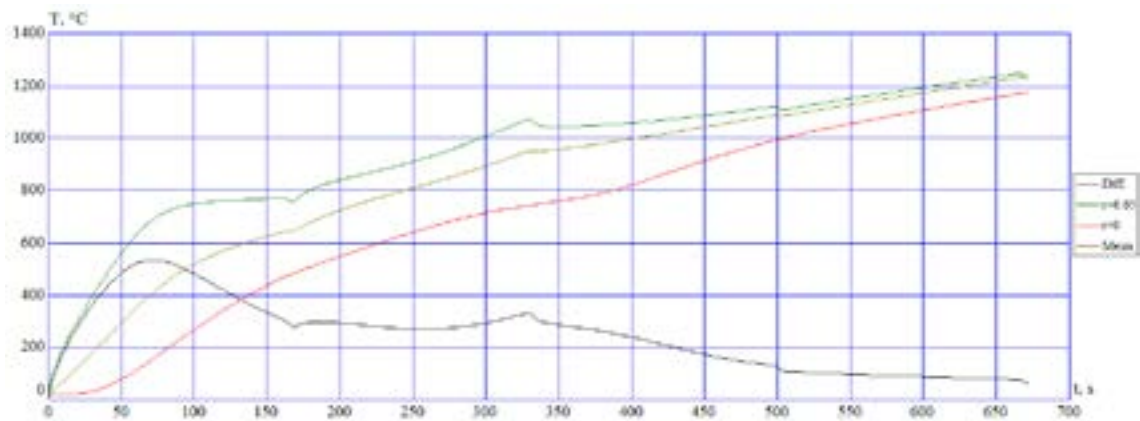


Dia 139 @ 2700 kg/h – dT 525 °C – 1245 °C – dTcs 65 °C

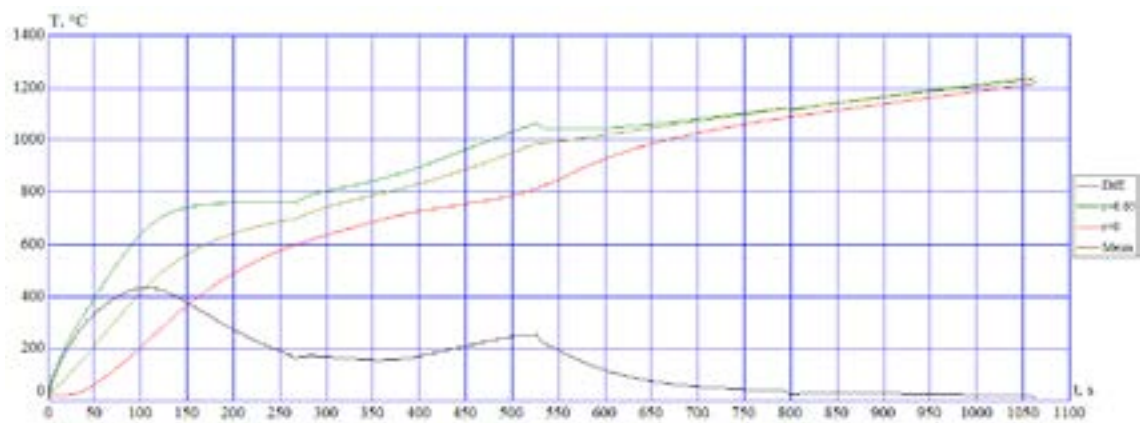


Dia 139 @ 1700 kg/h – dT 420 °C – 1257 °C – dTcs 18 °C

Simulations for dia 133 mm cylindrical billet steel work program specification

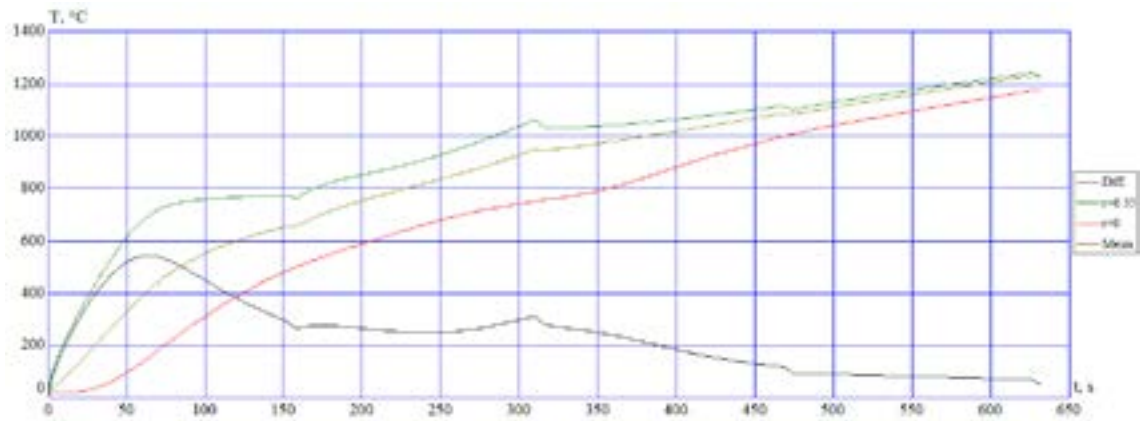


Dia 133 @ 2700 kg/h – dT 532 °C – 1245 °C – dTcs 75 °C

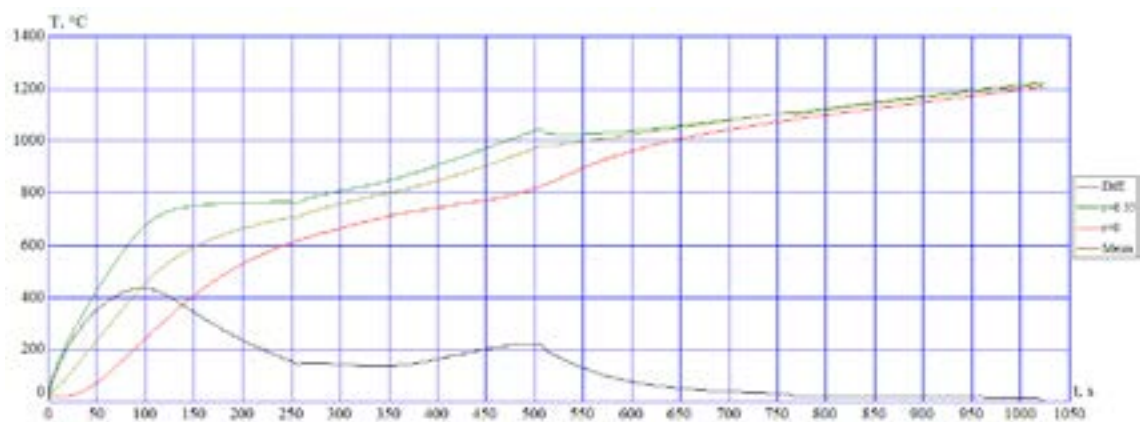


Dia 133 @ 1700 kg/h – dT 432 °C – 1232 °C – dTcs 18 °C

Simulations for dia 127 mm cylindrical billet steel work program specification

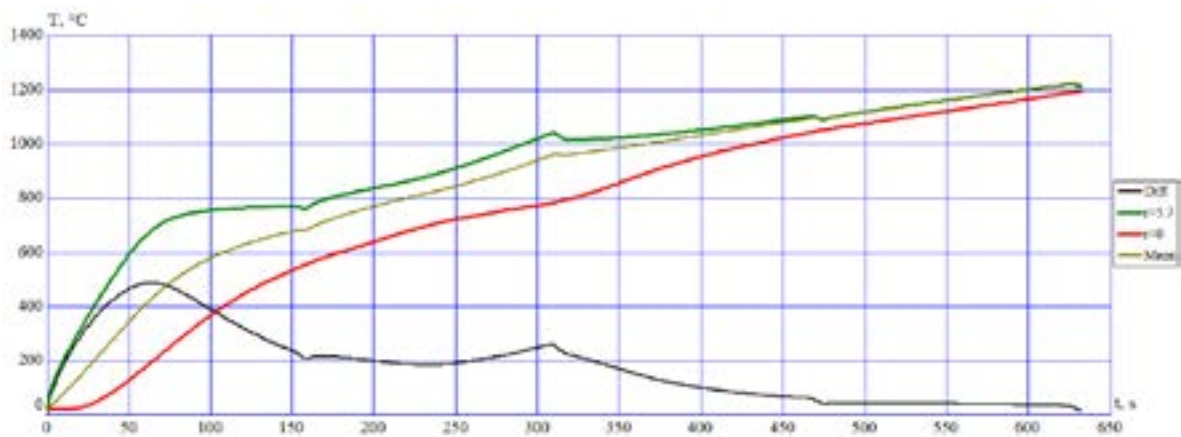


Dia 127 @ 2700 kg/h – dT 538 °C – 1240 °C – dTcs 68 °C

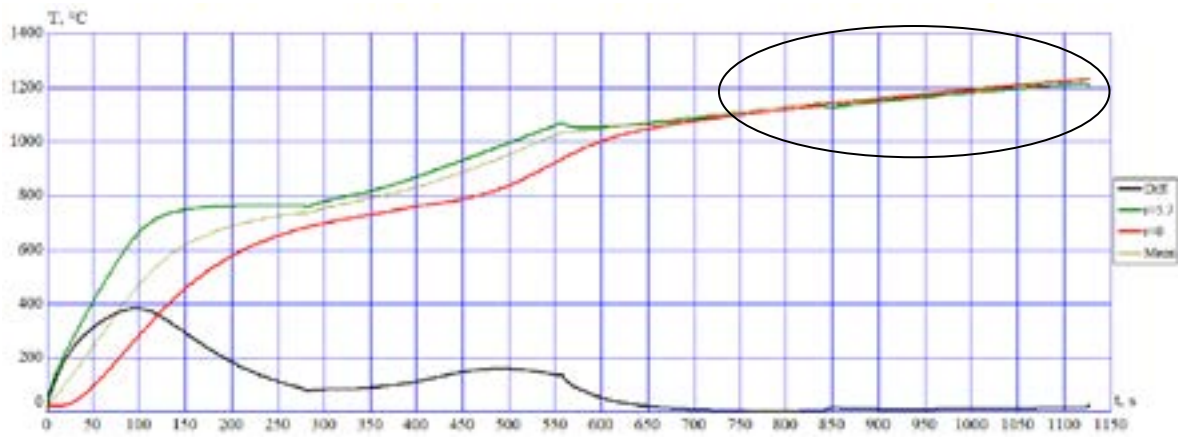


Dia 127 @ 1700 kg/h – dT 430 °C – 1215 °C – dTcs 14 °C

Simulations for dia 114 mm cylindrical billet steel work program specification



Dia 114 @ 2368 kg/h – dT °C – 1220 °C – dTcs 30 °C

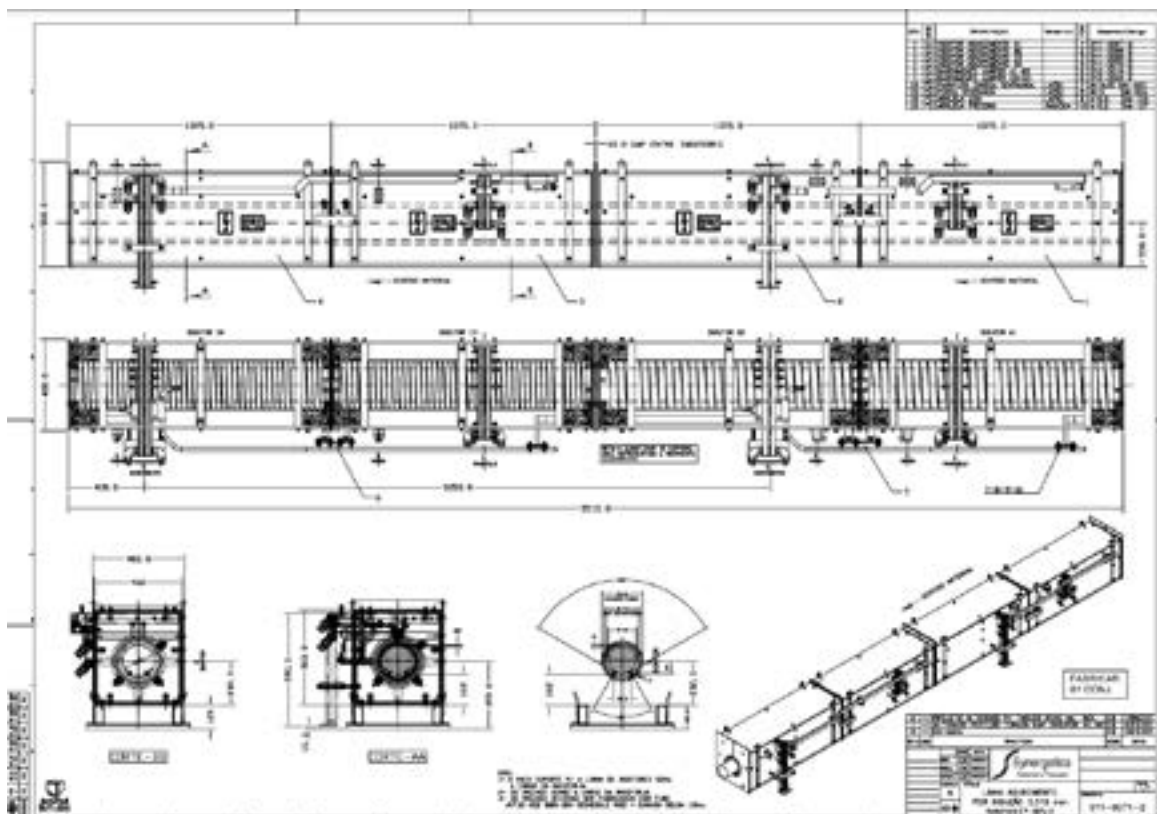


Dia 114 @ 1300 kg/h – dT 370 °C – 1230 °C – dTcs -15 °C

The area highlighted in the heating curve is very critical due to possible billet sticking. Temperature at the Surface become lower than at the center of the billet.

3.4 Mechanical design of the new line

New line design characteristics 5500 mm					
billet exit	←				billet in
	Coil #4	Coil #3	Coil #2	Coil #1	
L indutor	1375	1375	1375	1375	(mm)
Dia cu	212	212	212	212	(mm)
Dia ref	174	174	174	174	(mm)
L cu	1295	1295	1295	1295	(mm)
Nesp	40	40	40	20	
Water flow	3 x 35	3 x 35	3 x 50	4 x 20	(lpm)



5,5 meters long coil line layout

3.5 Comparison between integral electrical parameters and tryout

During tryout Capacitor bank was set to 1281 microFarad .

Electronic cards signals and start up frequency were checked and adjusted to the range of 700 Hz to 1000 Hz.

Temperature tryout test (*) was set to maximum 1100 °C to avoid overheat the production billets.

Dia (mm)	146	139,69	139,69	127	114,30	
Prod 100% / min	2700	2700	1700	2700	1800	(kg/h)
Pinch roll vel.	5,7	6,3	3,9	7,6	6,3	(mm/s)
Prod at set vel.	2696	2704	1674	2720	1817	(kg/h)
Uref PLC = Umf	740	770	700	780	780	(V)
Temp at pyro *	1100	1080	1116	1000	1080	(°C)
Banco Cap (µF)	1281	1281	1281	1281	1281	(µF)
Inverter						
Fmf	757	735	725	700	678	(Hz)
Ucoil (calc)	714	739	628	758	750	(V)
Imf (real)	1336	1305	1103	1107	887	(A)
Phimf (real)	14,17	13,76	13,76	13,1	12,7	(graus el.)
Umf (real)	740	770	700	780	780	(V)
Delta U	26 (+3,6%)	31 (+4,2%)	72 (+11,5%)	22 (+2,9%)	30 (+4,0%)	(kW)
Pcoil (calc)	885	881	624	829	670	(kW)
Pmf (real)	960	976	750	840	675	(kW)
Delta P	75 (+8,5%)	95 (+10,8%)	126 (+20,2%)	11 (+1,3%)	5 (+0,8%)	kW
Prail (estimated)	73	73	73	73	73	(kW)
P (rail+calc)	958	954	697	902	743	(kW)

Uref PLC needs to be confirmed with real Umf at inverter after frequency range of inverter was modified. By experience Delta U for coil calc minus Umf real can vary from 5% to 12% for this type configuration.

Data sheet based on running program for production from 50% to 110% and basic interpolation calculates to find Uref set point to PLC machine.

1100oC													
Dia	07,00	07	07	07	07	07	07	07	07	07	07	07	07
Prod	[t]	180	195	180	90	80	70	63	60	50			
Prod	[kg/h]	2970	2835	2700	2430	2160	1890	1700	1620	1350			
Freq	[Hz]												
freq	[s]												
Idelay	[s]												
Prod	[kg/h]												
v	[mm/s]												
1000oC													
Dia	07,00	07	07	07	07	07	07	07	07	07	07	07	07
Prod	[t]	180	195	180	90	80	70	63	60	50			
Prod	[kg/h]	2970	2835	2700	2430	2160	1890	1700	1620	1350			
Freq	[Hz]												
freq	[s]												
Idelay	[s]												
Prod	[kg/h]												
v	[mm/s]												
040 oC													
Tsaída	*C med												
dT	*C												
U1	[V]												
I1	[A]												
PF1	n												
P1	[kW]												
U2	[V]												
I2	[A]												
PF2	n												
P2	[kW]												
U3	[V]												
I3	[A]												
PF3	n												
P3	[kW]												
U4	[V]												
I4	[A]												
PF4	n												
P4	[kW]												
U1+U2	[V]												
U3+U4	[V]												
Umedias	[V]												
Ptot	[kW]												
Cons	[kWh]												
Prod	[kg/h]												
v	[mm/s]												
Umedias	[V]												
Icoil	[A]												
Pcoil	[kW]												
PF coil	n												
c	[kWh]												
c	[kWh]												

Exemplo para o dia 127 mm
De 110% a 50 % da produção
nominal a
1100 oC / 1240 oC / 1300 oC

Uref set point to be placed in the PLC machine program as indexed table

Interlocks to PLC, both (kg/h) and (mm/s) versus Uref set point to avoid mistaken on set up that could cause overheating of billet along the coil line



Uref plc versus velocity of pinch roll and vice-versa.

Conclusion:

Use of ELTA / 2DELTA programs for analysis and design of a forging line based on thermal and productivity specification helped the project team with expertise on engineering thermal specification, electrothermal programs, mechanical design, inverter and PLC software in achieving the production specs target goal.

The project achieved the goal for production target:

- >>>> In just one coil line
- >>>> No need to capacitor bank setup
- >>>> The coil line it is running since january/2022
- >>>> Interlocks to PLC , vel (mm/s) versus Uref set point to avoid overheating of billet along the coil line

Special thanks to Dr. Alexander N. Ivanov for the advices during the project and review of this paper.

References

1. Zerbini, J. C., Aquecimento Indutivo Aplicado em Processos de Forjamento a Quente, 2.o Seminário de Tecnologia de Aquecimento por Indução, 14 e 15 março 2023, Fundação Santo Andre, Santo André, São Paulo
2. Zerbini, J.C., Bukanin, V., Ivanov, Tecnologia del calentamiento por inducción aplicada en procesos de forja, IV Seminário de Forja –Instituto de Tecnologia Industrial, INTI Mecánica, Buenos Aires, Argentina, junho 2018.
4. Bonnemezón A. J., Krahmer D. M., Abate, G., Martynenko, V., Riu, Módulo de forja básico, INTI-IAEA.
5. Centre Français de L'Electrecite, Electromagnetic Induction and Electric Conduction in Industry, 1997, originally published as: "Induction, conduction électrique dans l'industrie" by Électricité de France – ISBN 2-86995-022-5.
5. Bukanin, V., Ivanov, A., Zerbini J.C., Electrothermal analysis for effectiveness of induction forge heating, 37^o SENAFOR, 2017, Brasil.
6. Nemkov, V., Bukanin, V., Ivanov, A., Zerbini, J.C., Perspective of using electrothermal software programs in investigation of forge heating by induction, 36^o SENAFOR, 2016, Brasil.
7. Bukanin, V., Ivanov, A., Zerbini, J.C., Vasconcelos, A., Use of the ELTA software for study of electromagnetic and thermal processes in induction heating steel forging lines, 35^o SENAFOR, 2015, Brasil.
8. Zerbini, J.C., Aquecimento para forja e conformação por indução, I Seminário de Aquecimento por Indução na Metalurgia, Grupo Aprenda / SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, Osasco, São Paulo, 2015.
9. Del Rio, Jesus, Deformación plástica de los materiales – La forja e la laminación en caliente, Barcelona, 1980
10. Rui, Francesco, Thesys, Numerical Analysis of Inhomogeneous Inductive Heating for Forging Parts, 2014/2015, Università degli Studi di Padova, Leibniz Universität Hannover.



42nd S E N A F O R
26th International Forging Conference
25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming
Conference / 9th BrDDRG Congress
12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS
October 4-6, 2023

Previsão de Quebra por Fadiga em Ferramenta de Forjamento a Frio

Fatigue Cracking Prediction in a Cold Forging Die

Nicolas S. Machado ⁽¹⁾
Alisson S. Duarte ⁽²⁾

RESUMO

A quebra de ferramentas no forjamento a frio de fixadores influencia diretamente na eficiência da produção, aumentando os seus custos. Este desenvolvimento se baseia no forjamento a frio de um fixador, para o qual as ferramentas quebram sistematicamente por fadiga. Utilizando o software QForm UK, foi proposto um modelo de previsão da quebra por fadiga termomecânica, corroborando com as regiões de início das trincas e de evolução para a quebra. A partir deste modelo, tornou-se possível sugerir alterações para que sejam verificadas por simulação e posteriormente testadas em prática.

Palavras chave — Forjamento a Frio, Fadiga, Vida Útil, Ferramentas, Matrizes, Simulação Numérica, Elementos finitos.

Abstract

Dies cracking in cold forging processes of fastenings have a direct influence on the manufacturing efficiency, increasing its costs. The present development is based on the cold forging of a fastening, in which dies present a systematic fatigue cracking. Using the QForm UK software, an FE model was proposed for a thermomechanical fatigue prediction, in attention to the cracking start and its evolution to a catastrophic failure. Therefore, based on this FE model it has been possible to define an strategy of modification in the process towards costs reduction.

Key words — Cold Forging, Fatigue, Die Life, Tooling, Numerical Simulation Finite Elements Method.

⁽¹⁾ Engenheiro mecânico, nico.mach@hotmail.com

⁽³⁾ Engenharia de Simulação, SIXPRO Virtual&Practical Process, Brasil, contato@sixpro.pro

1. Introdução

Diversos aspectos são levados em consideração na hora de desenvolver um processo de conformação a frio. Os principais fatores considerados para o desenvolvimento dos processos de conformação são os econômico-financeiros e a garantia de propriedades mecânicas adequadas para cada aplicação a que se destinam os produtos fabricados [1], tendo em vista que as ferramentas podem representar uma porcentagem significativa do custo do produto final é favorável sempre extrair a maior vida útil possível de um certo ferramental. Para isso, diversas análises e testes com novas geometrias são geralmente necessárias. Através da simulação computacional isso pode ser realizado de forma virtual e posteriormente validado através de testes práticos. A grande vantagem dessa abordagem é testar diversas possibilidades de maneira rápida e com baixos custos, além da obtenção de dados que sem a simulação computacional não seria possível, ou seria de difícil obtenção, como as tensões nas ferramentas, por exemplo.

As ferramentas de conformação a frio são formadas, principalmente, pelas matrizes fixas e matrizes móveis e, ainda, as matrizes fixas podem ser constituídas de capa (carcaça), anéis de contração (sobrecapa), núcleos (insertos) e extratores [1]. Na Figura 1 é mostrado a representação de uma matriz fixa com anéis de contração. Os anéis de contração realizam o pré-tensionamento do núcleo, diminuindo as tensões de tração tangenciais do núcleo, em alguns casos os anéis de contração ajudam inclusive nas tensões axiais, já que os esforços de tração são diminuídos por forças no sentido contrário, esse fenômeno pode ser observado na simulação numérica.

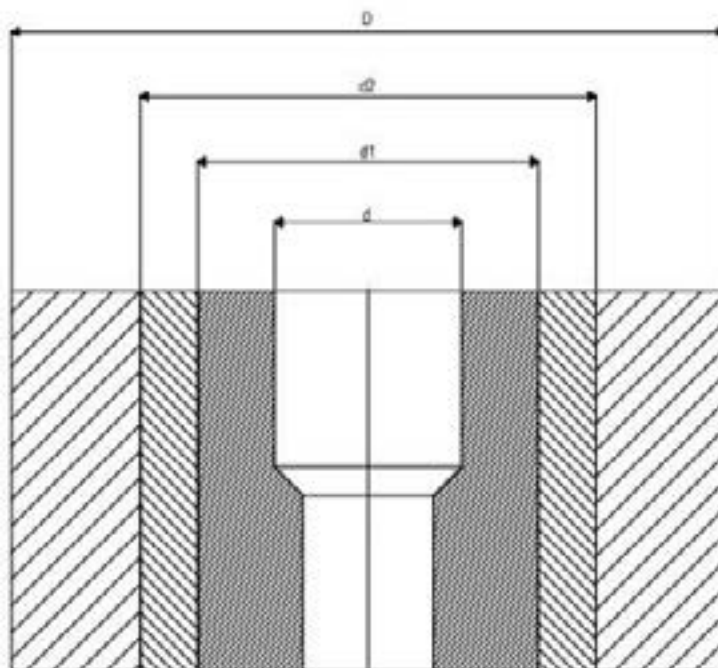


Figura 1 – Representação de anéis de contração para ferramenta de conformação [1].

A fadiga é um fenômeno pelo qual uma ferramenta pode falhar, podendo ser definida como o acúmulo de danos microscópicos com os contínuos ciclos até que uma trinca se desenvolva ou até que outro dano macroscópico cause a falha do componente [2]. Com o entendimento do comportamento mecânico do material da ferramenta pode-se utilizar a simulação numérica para obtenção das tensões atuantes e número de ciclos até a falha, é possível prever o número de peças, ou ciclos de forjamento, a serem fabricados até que o ferramental comece a sofrer ruptura por fadiga, com especial atenção para os casos de fadiga de baixo ciclo [3]. O número de ciclos para o início da trinca por fadiga (Manson-Coffin-Basquin) pode ser determinado pela equação 1.

$$Nf = \frac{2 - \left(\frac{\sigma}{\sigma_{CT}}\right)^2}{2 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{CT}}\right)^2} \quad (\text{Eq. 1})$$

sendo:

- ϵ_{CP}^p = Deformação plástica acumulada.
- ϵ_{CF} = Deformação na fratura sob solitação axial cíclica.
- σ_f^r = Tensão verdadeira na fratura sob solitação axial cíclica.
- σ_{cmm} = Tensão cíclica média.
- σ_{cma} = Amplitude da tensão cíclica.
- a = Expoente que indica a não linearidade do acúmulo de dano.
- b = Inclinação da parte elástica da curva de fadiga.

Uma das formas mais modernas para desenvolvimento de novos ferramentais é pelo método dos elementos finitos auxiliado pelos sistemas CAE. A utilização da simulação numérica, baseada no método dos elementos finitos, desempenha atualmente um papel de relevo no desenvolvimento de novas metodologias de concepção, projeto e fabricação, é fundamental para o lançamento de novos produtos e processos tecnológicos [4]. A fim de desenvolver modelos que reflitam a realidade de forma mais assertiva, é necessária a inserção de dados e a escolha dos modelos matemáticos que reflitam as condições de conformação.

Outra etapa muito importante é a validação experimental do modelo computacional. Esse tipo de validação exige a fabricação de peças e pode ser efetuado através de ensaios realizados em ambiente laboratorial controlado ou, alternativamente, através de observações e medições realizadas diretamente na produção [4]. Diversos equipamentos e análises podem ser utilizadas para validação experimental, como células de carga, máquinas de medição de coordenadas e projetores de perfil, durômetros, entre outros.

Porém, nem sempre há a disponibilidade de tais equipamentos para validação do processo. Uma das análises que podem ser realizadas sem equipamentos de medição é a contagem de peças fabricadas com uma determinada ferramenta. A partir disso, é possível entender a vida útil de uma ferramenta. Então, após o entendimento real da vida útil da ferramenta, é possível ajustar o melhor modelo de fadiga para o comportamento real. Este artigo tem como objetivo determinar um modelo validado em razão da sua comparação com os resultados obtidos em prática.

2. Processo prático

O processo de fabricação de um determinado componente mecânico, um fixador, é realizado através de três golpes de forjamento a frio. Assim, o tarugo inicial recebe um recalque, depois é transformado em pré-forma e, finalmente, toma a forma forjada final. Amostras de cada forma obtida nessas operações estão apresentadas na Figura 2.

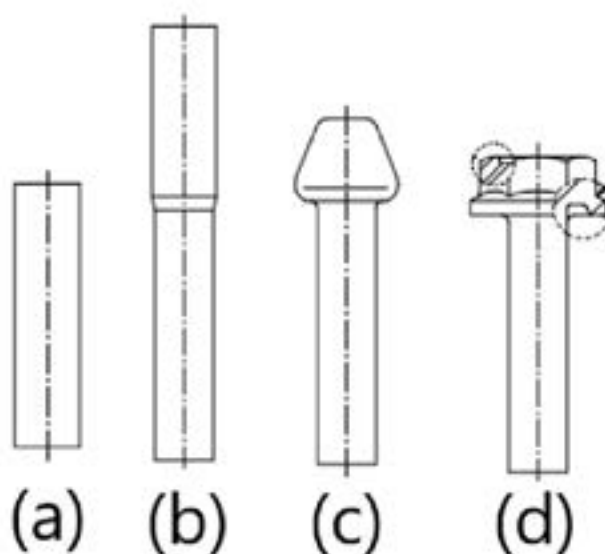


Figura 2 – Fixador fabricado por forjamento a frio em três estágios: (a) tarugo, (b) recalque, (c) pré-forma e (d) forma final.

Embora o processo de fabricação seja realizado da maneira mostrada na Figura 2, a matriz utilizada na terceira e última operação sofre quebra, reduzindo a produtividade e aumentando os custos de ferramentaria e de operação. Um ferramental inferior típico para o forjamento na terceira operação, preparado e montado (núcleo e carcaça), está mostrado na Figura 3 (a). Após um trabalho de fabricação de aproximadamente 80.000 peças, esta matriz sofreu falha catastrófica, havendo três exemplos dessa falha catastrófica apresentados na Figura 3 (b,c,d). Estas falhas foram analisadas e identificadas como falhas por fadiga. Inclusive, umas destas ferramentas utilizadas na produção foi retirada da linha com uma quantidade muito inferior de golpes, na qual se identificou o estágio inicial da formação de uma trinca por fadiga, como pode ser observado na Figura 4.

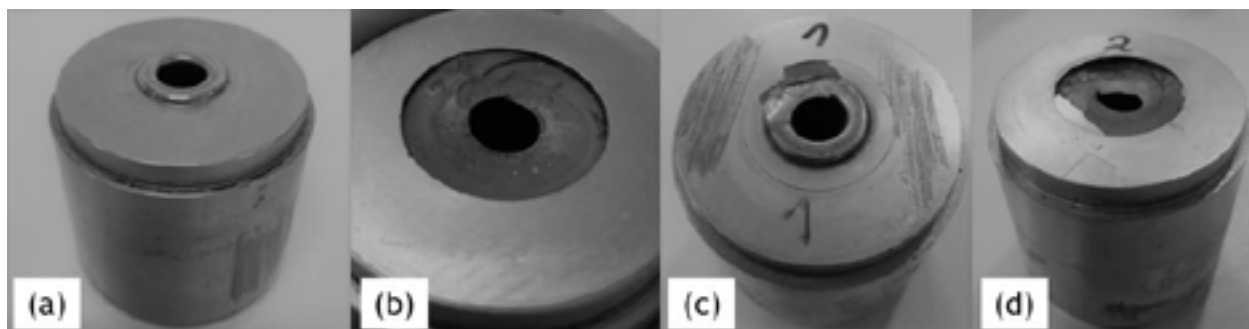


Figura 3 – Matrizes de forjamento (a) nova e (b,c,d) usadas com fraturas por fadiga.

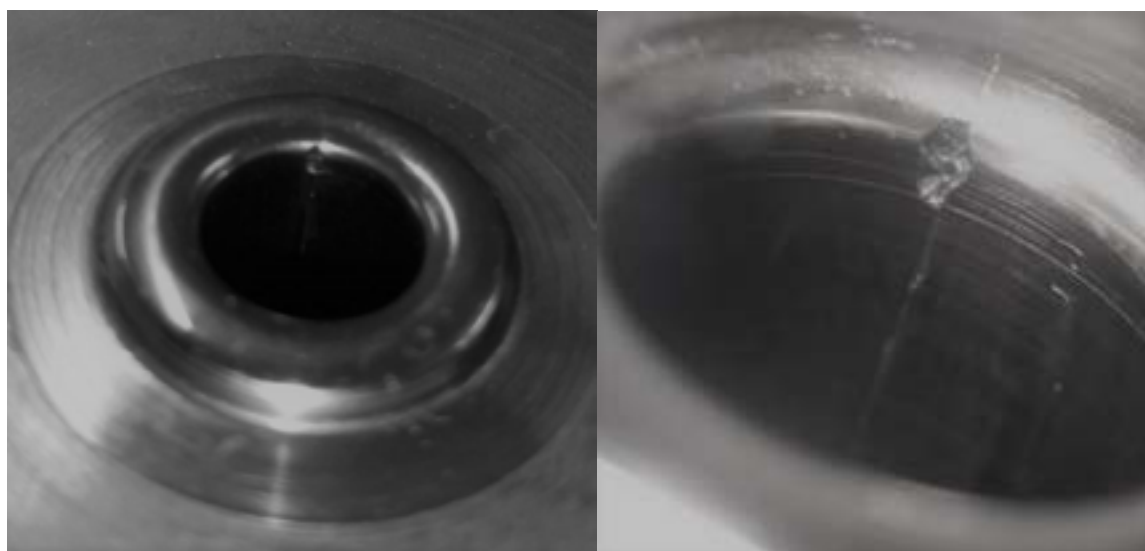


Figura 4 – Indicação do início da trinca por fadiga.

3. Simulação computacional

O processo de forjamento a frio foi simulado utilizando o software QForm UK (Micas Simulation Ltd., Oxford, UK). As três operações estão mostradas na Figura 5, sendo as duas primeiras operações simuladas em 2D e a última em 3D. O tarugo em aço 15B21 H, à temperatura ambiente, foi golpeado 3 vezes por uma prensa mecânica de 100 golpes/min, nas quais as matrizes foram lubrificadas de maneira a obter uma condição híbrida, com fator de atrito 0,1 e coeficiente de Coulomb de 0,05. A peça final simulada pode ser vista na Figura 6.

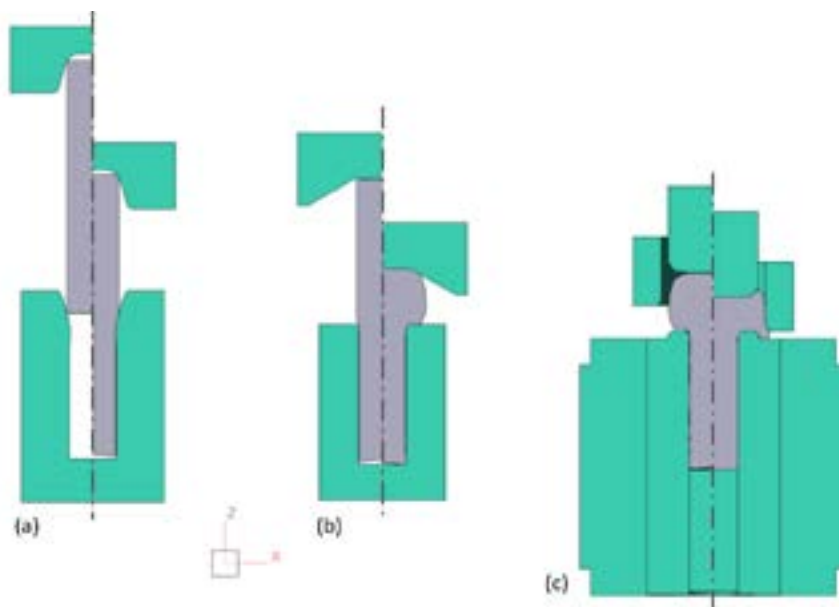


Figura 5 – Forjamento a frio de um fixador: (a) primeiro, (b) segundo e (c) terceiro estágio.



Figura 6 – Peça final forjada simulada.

Analisando a matriz inferior na terceira operação, foi possível realizar cálculos de vida útil por fadiga (Eq. 1) como mostrado na Figura 7. Observa-se que as regiões críticas de falha por fadiga compreendem toda a região do “anel”, incluindo regiões adjacentes abaixo, correspondendo exatamente à porção da matriz que sofreu “arrancamento”, mostrada na Figura 3. Ajustando a escala de ciclos de forjamento, como na Figura 8, ficou evidente a região de início da trinca por fadiga, correspondendo exatamente à região mostrada na Figura 4, a qual evidencia a região de início da trinca na prática. Com relação ao número de ciclos previstos na simulação, é importante dizer que a região de início da trinca foi definida com baixo número de ciclos, ou seja, caracterizando o fenômeno como fadiga de baixo ciclo. No entanto, as regiões adjacentes abaixo (onde ocorreu o “arrancamento”) apresentaram variação, incluindo valores próximos a 80.000 ciclos, os quais são condizentes com o número de ciclos para a falha catastrófica observada na prática.

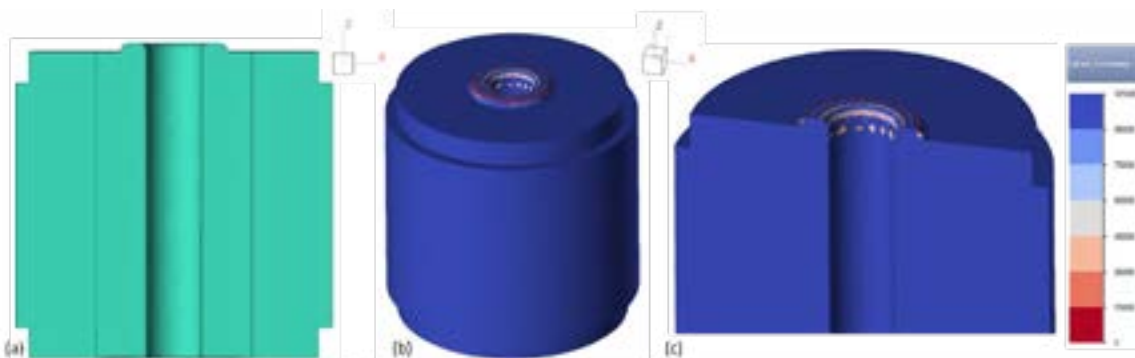


Figura 7 – (a) Ferramental inferior da terceira operação e (b,c) a previsão de falha por fadiga.



Figura 8 – Indicação da região de início da fratura por fadiga.

As tensões que surgem na matriz e que dão origem à falha e quebra são oriundas da pressão exercida pela peça sendo conformada. Observando a distribuição da pressão normal ao longo da superfície da matriz no momento final do forjamento (ponto morto inferior da prensa), como apresentado na Figura 9, constatou-se uma mudança acentuada no comportamento da pressão normal de maneira bastante delineada. Essa mudança acentuada coincide com a região de início da trinca por fadiga, observada tanto na prática quanto na simulação. Foi traçada uma linha de apenas 2 mm na superfície da ferramenta, passando pelo ponto de início da trinca por fadiga, a qual pode ser visualizada na própria Figura 9. A evolução da pressão normal ao longo dessa linha está apresentada na Figura 10, na qual o ponto de início da trinca está localizado na medida de aproximadamente 1 mm. Neste ponto de 1 mm ocorre um aumento expressivo da pressão normal, chegando a atingir picos de até 5.000 MPa.

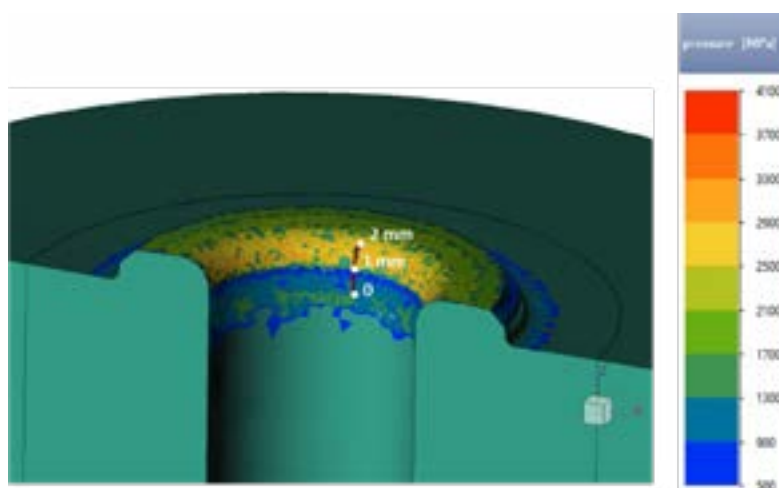


Figura 9 – Distribuição da pressão normal na superfície da matriz no momento final do forjamento.

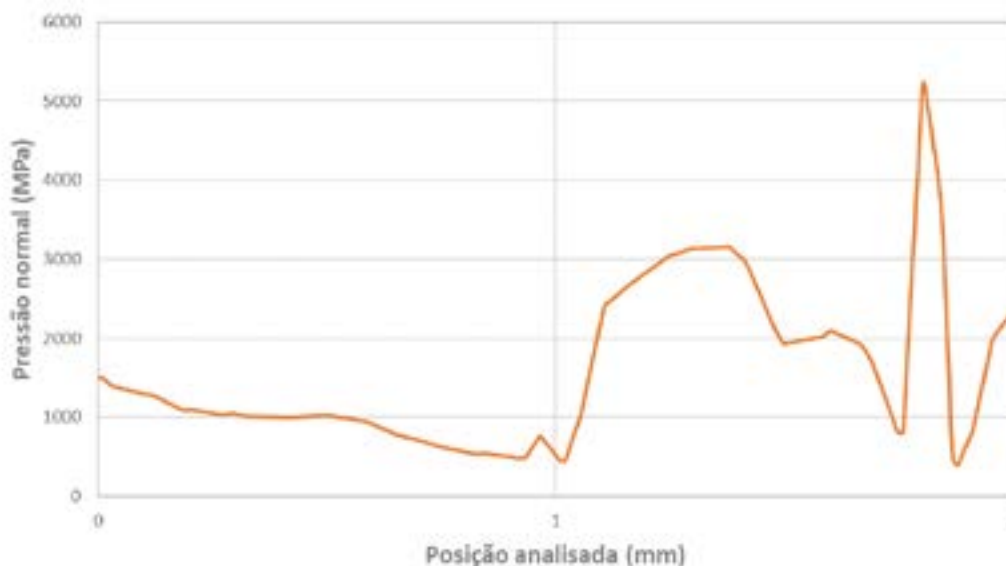


Figura 10 – Variação da pressão normal ao longo da superfície da matriz, na região de início da trinca por fadiga, no momento final do forjamento.

Com base nas análises apresentadas, estão sendo definidas estratégias de alteração do processo de forjamento, as quais poderão ser investigadas primeiramente com base no modelo de simulação definido. Alterações nas pré-formas têm sido avaliadas com foco na redução dos valores de pressão normal exercida sobre a superfície da matriz. Alterações no projeto das matrizes também estão sendo consideradas.

4. Conclusões

Foi possível elaborar um modelo de simulação com base no Método dos Elementos Finitos capaz de prever de maneira detalhada a vida útil por fadiga da matriz na terceira operação. Correlacionando a pressão normal exercida pela peça sendo conformada sobre a superfície da matriz com a previsão da fadiga, compreendeu-se a severidade do processo na terceira operação em termos de cargas sofridas pela ferramenta. Assim, fica estabelecido um modelo altamente sofisticado, capaz de evidenciar fenômenos correntes no processo de forjamento, servindo de base para elaboração de estratégias de solução, além de poder ser utilizado para testar modificações sugeridas para aumento da vida útil da ferramenta.

REFERÊNCIAS

- [1] Suski, Cássio Aurélio. Conformação mecânica de múltiplos estágio / Cássio Aurélio S Suski. - Florianópolis: Publicações do IFSC, 2014.
- [2] DOWLING, MECHANICAL BEHAVIOR OF MATERIALS. Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue, 4^a ed. - Londres: Pearson Education, 2012.
- [3] Santos, Genival G. A influência da prensagem no desempenho do ferramental de um forjado a frio – 41^o SENAFOR, 2022.
- [4] Rodrigues, Jorge. Tecnologia mecânica; Tecnologia da Deformação Plástica – Lisboa: Escolar Editora, 2010.



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil

26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de
Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG

*25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming
Conference / 9th BrDDRG Congress*

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis

12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

INDÚSTRIA 5.0 X GESTÃO 5.0 – IMPACTOS NA INDÚSTRIA DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA

Vilson Gruber ⁽¹⁾
Lírio Schaeffer ⁽²⁾

RESUMO

O artigo examina a evolução dos paradigmas industriais e de gestão, destacando a emergência da Indústria 5.0 e da Gestão 5.0 como sucessoras das abordagens 4.0. O foco central desses novos paradigmas é fortalecer a sinergia entre seres humanos e sistemas automatizados, visando otimizar o desempenho e resultados no setor industrial. Dentre os tópicos explorados, destaca-se a interação humano-robô, que promete transformar a dinâmica de trabalho; a customização em massa, permitindo produções adaptadas às necessidades individuais; a manufatura aditiva, que revoluciona os processos de fabricação; e a análise de dados combinada com a Internet das Coisas (IoT), que proporciona uma visão mais aprofundada e integrada das operações industriais. O artigo também aborda como objetivo central uma proposta de criação de um framework para pesquisa nas indústrias de conformação mecânica onde pretende mostrar que a crescente necessidade de capacitação e desenvolvimento de habilidades em meio a essa revolução tecnológica, bem como a relevância das Novas Tecnologias da Informação e Comunicação serão necessárias para a evolução dessas indústrias. Finalizando o estudo, este propõe um modelo de framework que questionará os impactos potenciais desses avanços na indústria como um todo, com um olhar particular para a indústria de conformação mecânica, buscando compreender as transformações e desafios específicos desse segmento.

Palavras Chave: Indústria 5.0; Gestão 5.0; indústria de conformação mecânica.

⁽¹⁾ Prof. Dr. Eng., Universidade Federal de Santa Catarina.

⁽²⁾ Prof. Dr. Ing., Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

INDUSTRY 5.0 X MANAGEMENT 5.0 – IMPACTS ON THE MECHANICAL FORMING INDUSTRY

ABSTRACT

The article examines the evolution of industrial and management paradigms, highlighting the emergence of Industry 5.0 and Management 5.0 as successors to the 4.0 approaches. The central focus of these new paradigms is to strengthen the synergy between humans and automated systems, aiming to optimize performance and results in the industrial sector. Among the topics explored are human-robot interaction, which promises to transform work dynamics; mass customization, allowing productions adapted to individual needs; additive manufacturing, revolutionizing manufacturing processes; and data analysis combined with the Internet of Things (IoT), providing a more in-depth and integrated view of industrial operations. The article also addresses as its central objective a proposal to create a research framework in the mechanical forming industries where it intends to show that the growing need for training and skills development amidst this technological revolution, as well as the relevance of New Information and Communication Technologies will be necessary for the evolution of these industries. Concluding the study, it proposes a framework model that will question the potential impacts of these advances on the industry as a whole, with a particular look at the mechanical forming industry, seeking to understand the transformations and specific challenges of this segment.

Key words: Industry 5.0; Management 5.0; mechanical forming industry.

1. INTRODUÇÃO

Depois de um período de profunda discussão sobre a indústria 4.0, o foco central atual já se delinea em torno de um novo paradigma, a indústria 5.0. Com efeito, se a indústria 4.0 é percebida como de vital importância desde o início, devido à sua habilidade de potencializar a eficiência e a produtividade de organizações e indústrias, também é correto afirmar que ela traz uma série de preocupações. Entre estas, destaca-se o papel dos seres humanos nas organizações e o nível de desemprego que pode surgir em virtude da automação crescente introduzida pela indústria 4.0. [1]

Nesse contexto, mais recentemente, nos deparamos com a assim denominada 5ª revolução industrial. Nela, o ser humano assume uma posição de destaque graças à sua capacidade de raciocínio, permitindo, assim, que ele explore de maneira mais eficaz a “inteligência” de softwares e/ou aplicativos computacionais, viabilizando o desenvolvimento de soluções personalizadas. Dessa forma, estamos perante a indústria 5.0. Ao explorar o potencial de pesquisa e inovação, esta favorece a transformação das organizações em entidades mais resilientes, sustentáveis e com foco no elemento humano. [2]

A sustentabilidade emerge como um foco principal na conceituação da Indústria 5.0, refletindo as preocupações contemporâneas com poluição ambiental, aquecimento global e esgotamento de recursos energéticos. Diversas sociedades, especialmente na Europa, estão conscientizando-se mais acerca dos perigos do consumo excessivo e exploração de recursos naturais. O objetivo da Indústria 5.0 é, assim, promover uma indústria mais sustentável e centrada no ser humano. [3]

A trajetória das práticas industriais e de gestão tem se transformado incessantemente ao longo do tempo. Desde a alvorada da primeira revolução industrial até a atual era digital, cada etapa introduziu desafios inéditos e abriu portas para novas oportunidades. Com a emergência da Indústria 5.0 e da Gestão 5.0, essa evolução torna-se ainda mais profunda, destacando a convergência harmoniosa entre as habilidades humanas e as potencialidades tecnológicas. Neste contexto, apresento uma visão inicial sobre os principais aspectos dessas inovações:

A. Interação humano-robô:

Na vanguarda da Indústria 5.0 está a interação humano-robô, onde robôs e humanos trabalham lado a lado no ambiente de trabalho. Ao contrário da automação completa, aqui a ênfase é na cooperação, permitindo que máquinas aprendam com humanos e vice-versa. A importância dos aspectos sociais relacionados ao conceito de Indústria 5.0, Zhang et al. (IEEE Trans Comput Soc Syst 5:829–840, 2018) propuseram uma mudança de paradigma de sistemas ciber-físicos (CPS) para sistemas ciber-físico-sociais (CPSS) [4].

Esta colaboração promete aumentar a eficiência e a segurança nos processos de produção. A interação humano-robô na Indústria 5.0 representa uma mudança paradigmática na forma como entendemos e implementamos a automação industrial. Aqui, esboço alguns dos principais aspectos dessa revolucionária abordagem:

- ✓ **1. Complementaridade de habilidades:** Enquanto robôs são extremamente precisos, rápidos e consistentes, os seres humanos trazem criatividade, flexibilidade e capacidade de tomada de decisão em situações complexas. Juntos, humanos e robôs podem alcançar níveis de produtividade que seriam inatingíveis individualmente.
- ✓ **2. Aprendizado mútuo:** Através da aplicação de técnicas de aprendizado de máquina e inteligência artificial, robôs podem aprender com humanos, ajustando-se às suas preferências e técnicas. Simultaneamente, humanos se adaptam ao modo de operar dos robôs, estabelecendo uma relação simbiótica.
- ✓ **3. Segurança aprimorada:** Robôs modernos são projetados para detectar a presença humana e reagir em tempo real. Isso significa que, em vez de um ambiente de trabalho segmentado onde humanos e máquinas são mantidos separados, podemos ter ambientes de trabalho integrados onde robôs podem parar ou ajustar suas operações se um ser humano se aproximar demais.
- ✓ **4. Flexibilidade no design do local de trabalho:** A interação humano-robô permite a coexistência em ambientes que tradicionalmente eram reservados apenas para humanos ou apenas para máquinas. Isso pode levar a designs de locais de trabalho mais flexíveis e ergonômicos.
- ✓ **5. Implicações sociais e éticas:** A colaboração entre humanos e robôs não se limita apenas a questões técnicas ou de eficiência. Ela também traz à tona questões sobre o papel dos robôs na sociedade, a natureza do trabalho e a dignidade humana no contexto da automação.

A interação humano-robô está remodelando a face da indústria, criando oportunidades e desafios únicos. Seu potencial para transformar processos e práticas é imenso, mas também exige uma reflexão cuidadosa sobre as implicações mais amplas para a sociedade e para o indivíduo.

B. Customização em massa:

A customização em massa representa uma abordagem onde produtos são personalizados conforme as necessidades específicas dos consumidores, mas ainda são produzidos em grande escala. Isso é possível graças à tecnologia avançada e aos sistemas de produção adaptáveis que conseguem responder rapidamente às demandas dos clientes.

C. Manufatura aditiva:

Popularmente conhecida como impressão 3D, a manufatura aditiva permite a criação de objetos através da adição de material camada por camada. Este método de produção transformador não só reduz o desperdício, mas também possibilita a fabricação de produtos complexos que seriam difíceis, ou até impossíveis, de se produzir usando métodos tradicionais.

D. Análise de dados e Internet das Coisas (IoT):

A IoT refere-se à rede de dispositivos físicos conectados que coletam e compartilham dados. Combinado com a análise de dados avançada, essas informações podem ser usadas para otimizar operações, prever manutenção de equipamentos e até mesmo desenvolver novos produtos ou serviços com base nas preferências do cliente.[5] A *“Internet das Coisas” (IoT)* representa uma das maiores revoluções tecnológicas da era moderna. Através da IoT, bilhões de dispositivos estão interconectados, desde simples sensores até maquinário complexo, todos coletando dados constantemente. Esta conectividade ampla e a subsequente coleta de dados têm implicações profundas para empresas, governos e indivíduos. E quando combinada com *“análise de dados avançada”*, a IoT se torna uma poderosa ferramenta para transformação digital e inovação. Aqui está uma exploração descrita mais detalhada dessa combinação:

1. **Monitoramento em Tempo Real:** Sensores e dispositivos IoT permitem que organizações monitorem operações em tempo real. Seja no controle de temperatura de uma cadeia de frio ou no rastreamento de um veículo de entrega, a IoT proporciona visibilidade instantânea e insights sobre várias operações.
2. **Predição e Manutenção Preditiva:** Ao analisar dados coletados por dispositivos IoT, é possível identificar padrões que indicam possíveis falhas ou desgaste de equipamentos. Esta capacidade de prever problemas antes que eles ocorram pode resultar em enormes economias, evitando paradas inesperadas e prolongando a vida útil do equipamento.
3. **Otimização de Processos:** A combinação de IoT e análise de dados permite uma avaliação contínua dos processos. Isso pode levar a melhorias na eficiência, redução de desperdícios e otimização da produção.
4. **Personalização e Inovação:** A análise de dados coletados através da IoT pode revelar padrões de comportamento e preferências dos consumidores. Com esses insights, empresas podem personalizar ofertas ou criar novos produtos e serviços que atendam às necessidades específicas dos clientes.
5. **Automação Inteligente:** Através da IoT e da análise de dados, sistemas podem tomar decisões automatizadas. Por exemplo, em um ambiente agrícola, sensores podem detectar a necessidade de irrigação e ativar sistemas de água automaticamente.

6. Segurança e Conformidade: Sensores e dispositivos podem monitorar ambientes para garantir que estejam em conformidade com normas e regulamentações, seja em termos de segurança, qualidade do ar ou qualquer outro parâmetro relevante.

7. Integração Interdisciplinar: A combinação de IoT e análise de dados não se limita a um único setor. Pode ser usado, por exemplo, para integrar operações de manufatura com cadeias de suprimentos e logística, garantindo que toda a operação seja sincronizada.

Podemos assim afirmar que a **Internet das Coisas e a análise de dados** estão redefinindo a maneira como as organizações operam e inovam. Esta combinação não apenas melhora a eficiência e a produtividade, mas também abre portas para novas oportunidades de negócios e modelos de serviço. Aqueles que adotam e integram essas tecnologias em suas operações estão se posicionando na vanguarda da transformação digital.

E. Capacitação e desenvolvimento de habilidades:

Na era da Indústria 5.0, a capacitação contínua é essencial. Com a rápida evolução tecnológica, os trabalhadores precisam adquirir novas habilidades e se adaptar para garantir que permaneçam relevantes e eficientes em suas funções. A capacitação e o desenvolvimento de habilidades na era da Indústria 5.0 não são apenas uma questão de manter-se atualizado; são fundamentais para a sobrevivência e prosperidade no novo ambiente de trabalho. Aqui estão alguns pontos relevantes sobre este tópico:

- ✓ **1. Habilidades Técnicas e Digitais:** A introdução de novas tecnologias e sistemas requer que os trabalhadores compreendam e operem ferramentas digitais avançadas. Isso inclui, por exemplo, a operação de máquinas de manufatura aditiva, a programação e manutenção de robôs, ou a análise de grandes volumes de dados.
- ✓ **2. Pensamento Crítico e Resolução de Problemas:** Com máquinas e algoritmos cuidando de tarefas rotineiras, os trabalhadores são frequentemente chamados a lidar com situações inesperadas ou complexas que exigem uma abordagem analítica e inovadora.
- ✓ **3. Aprendizado Contínuo:** A velocidade das inovações tecnológicas implica que o aprendizado não pode ser um evento único, mas sim um processo contínuo ao longo da carreira. Isso significa que os trabalhadores devem se tornar aprendizes autodirigidos, buscando constantemente atualizar seus conhecimentos e habilidades.
- ✓ **4. Habilidades Sociais e Emocionais:** Com a colaboração humano-robô tornando-se comum, os trabalhadores precisam desenvolver habilidades para trabalhar efetivamente ao lado de máquinas, bem como com colegas humanos em ambientes de trabalho cada vez mais diversificados.
- ✓ **5. Flexibilidade e Adaptabilidade:** A capacidade de se adaptar a novos papéis, ferramentas ou ambientes de trabalho é crucial. A natureza mutável do trabalho significa que os trabalhadores podem ter que mudar de função ou setor várias vezes ao longo de sua carreira.
- ✓ **6. Abordagem Interdisciplinar:** A complexidade dos sistemas modernos frequentemente exige uma combinação de habilidades de diferentes domínios. Por exemplo, um engenheiro pode precisar entender de design de produto, análise de dados e princípios de sustentabilidade.

- ✓ **7. Suporte Institucional:** Governos, instituições de ensino e organizações precisam reconhecer a importância da capacitação contínua e oferecer programas e recursos para apoiar o desenvolvimento de habilidades ao longo da vida.
- ✓ **8. Mentalidade de Crescimento:** Em um mundo em rápida evolução, os trabalhadores devem cultivar uma mentalidade aberta, pronta para aprender e se adaptar. Isso envolve reconhecer que as habilidades podem e devem ser desenvolvidas, em vez de serem fixas.

A capacitação e o desenvolvimento de habilidades na Indústria 5.0 são multidimensionais, abrangendo competências técnicas, sociais e cognitivas. À medida que a tecnologia redefine o trabalho, o sucesso individual e organizacional dependerá cada vez mais da capacidade de aprender, adaptar-se e inovar em face da mudança contínua.

F. Novas Tecnologias da Informação e Comunicação:

Essas são as tecnologias que sustentam a transformação digital na Indústria 5.0 e na Gestão 5.0. Desde plataformas de nuvem até soluções de realidade aumentada, essas tecnologias facilitam a comunicação, o compartilhamento de informações e a colaboração em tempo real entre equipes e sistemas. As Novas Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) representam uma gama ampla e em constante evolução de ferramentas e soluções que estão redefinindo a maneira como as organizações operam, interagem e entregam valor. Na Indústria 5.0 e na Gestão 5.0, elas são catalisadoras vitais para a inovação e a eficiência. Abaixo, detalho algumas dessas tecnologias e sua importância:

- ✓ **1. Plataformas de Nuvem:** Proporcionam flexibilidade, escalabilidade e acessibilidade, permitindo que empresas armazenem, processem e recuperem grandes volumes de dados de qualquer lugar do mundo. Elas também facilitam a implementação de soluções de Inteligência Artificial e Machine Learning, que requerem poder computacional significativo.
- ✓ **2. Internet das Coisas (IoT):** Sensores e dispositivos conectados coletam dados em tempo real de máquinas, produtos e ambientes. Esta informação contínua e em tempo real permite monitoramento, análise e tomada de decisão mais informada, otimizando operações e melhorando a eficiência.
- ✓ **3. Realidade Aumentada (RA) e Realidade Virtual (RV):** Estas tecnologias imersivas auxiliam na formação, manutenção, design e muitos outros campos, fornecendo visualizações 3D interativas e simulações realísticas. A RA, em particular, sobrepondo informações digitais ao mundo físico, pode ajudar trabalhadores a realizar tarefas complexas ou a treinar para situações específicas.
- ✓ **4. Blockchain:** Esta tecnologia de registro distribuído pode transformar cadeias de suprimentos e operações logísticas, garantindo transparência, segurança e rastreabilidade nas transações.
- ✓ **5. Redes 5G:** A quinta geração de tecnologia móvel promete velocidades ultrarrápidas e latência extremamente baixa. Isso é crucial para aplicações como veículos autônomos e operações industriais em tempo real.
- ✓ **6. Inteligência Artificial e Machine Learning:** Estas tecnologias permitem que sistemas "aprendam" a partir dos dados, melhorando continuamente seu desempenho. Elas têm aplicações variadas, desde a otimização da manutenção preditiva até o atendimento ao cliente automatizado.

- ✓ **7. Interfaces de Conversação e Chatbots:** Facilitando a interação entre sistemas e seres humanos, essas interfaces podem melhorar a eficiência do serviço ao cliente, a gestão de operações e a assistência em tarefas diárias.
- ✓ **8. Edge Computing:** Em vez de enviar todos os dados para um data center ou nuvem centralizada, o edge computing processa dados mais perto da fonte (por exemplo, uma máquina industrial). Isso permite análises e ações em tempo real, que são vitais para muitas aplicações industriais.
- ✓ **9. Digital Twins:** São representações digitais de um objeto ou sistema físico, permitindo simulações, análises e otimizações sem interferir no objeto real.

A novas TICs estão no cerne da Indústria 5.0 e da Gestão 5.0, impulsionando transformações profundas em todos os setores. As organizações que compreendem e adotam estas tecnologias estarão mais bem posicionadas para liderar em um ambiente de negócios cada vez mais dinâmico e competitivo e sustentável [6]. Em suma, a Indústria 5.0 e a Gestão 5.0 simbolizam a próxima fase da evolução industrial e gerencial, onde a combinação de humanos e máquinas promete levar a inovações sem precedentes e a um futuro mais sustentável e eficiente.

2. MOTIVAÇÃO

Vivemos em um momento de transição e inovação sem precedentes na história industrial e gerencial. A evolução das práticas e tecnologias, de sistemas puramente mecanizados até a atual convergência entre humanos e máquinas inteligentes, ressalta a necessidade de compreendermos os impactos e oportunidades que essas mudanças trazem para setores específicos da indústria.

A motivação para abordar o tema "*INDÚSTRIA 5.0 X GESTÃO 5.0 – IMPACTOS NA INDÚSTRIA DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA*" deriva do reconhecimento da importância da indústria de conformação mecânica como um pilar fundamental no mundo da manufatura. Esta indústria, responsável pela moldagem e conformação de metais, é essencial na produção de uma vasta gama de produtos e componentes que permeiam nosso cotidiano.

Com a chegada da Indústria 5.0 e Gestão 5.0, a interface entre humanos e tecnologia promete alterar profundamente a maneira como operamos, gerimos e inovamos nos processos de produção. Dissertar sobre este tema não é apenas uma exploração acadêmica, mas uma necessidade urgente para que líderes, gestores e profissionais do setor estejam preparados para navegar nesse novo cenário. Para tal estarei abordando o tema com a metodologia de criação de um framework para este entendimento e avaliação dos impactos.

Além disso, a compreensão detalhada desses impactos permitirá que empresas de conformação mecânica antecipem desafios, aproveitem oportunidades e continuem a prosperar em um ambiente cada vez mais competitivo e tecnologicamente avançado. Em essência, a motivação para discorrer sobre este tema é impulsionada pelo desejo de equipar a indústria com conhecimento, insights e estratégias para abraçar a próxima revolução industrial e gerencial de forma proativa e bem sucedida.

A seguir na tabela 01 apresento algumas pesquisas que estão sendo mostradas pelos seus autores referente ao tema Indústria 5.0 e Gestão 5.0 no mundo:

Tabela 01 – Indústria 5.0 e Gestão 5.0

Tema	Autores	Ano	Resumo
Comparing the Evolutionary Trajectories of Industry 4.0 and 5.0: A Management Fashion Perspective	D. Madsen, Kåre Slåtten	2023	O objetivo deste artigo é realizar um exame aprofundado desses dois conceitos de gestão relacionados, usando a teoria da moda gerencial como estrutura e lente interpretativa. Visualizar a Indústria 4.0 e 5.0 deste ponto de vista envolve analisar e rastrear as atividades de envolvimento dos fornecedores dos dois conceitos, bem como avaliar o impacto dos conceitos no lado da procura [7].
The fourth industrial revolution in the food industry-Part I: Industry 4.0 technologies.	A. Hassoun, A. Ait-Kaddour, A. Abu-Mahfouz, N. Rathod, Farah Bader, Francisco J. Barba, A. Biancolillo, Janna Crotova, Charis M. Galanakis, A. Jambrak, J. Lorenzo, I. Måge, F. Ozogul, J. Regenstein	2022	A era da Indústria Alimentar 4.0 tem sido caracterizada por novos desafios, oportunidades e tendências que remodelaram as estratégias e perspectivas atuais para os padrões de produção e consumo de alimentos, abrindo caminho para a mudança em direção à Indústria 5.0 [8].
Industry 5.0 Beyond Technology: An Analysis Through the Lens of Business and Operations Management Literature	M. Borchardt, G. Pereira, G. S. Milan, Annibal R. Scavarda, Edithe Nogueira, L. A. Poltosi	2022	Em comparação com a Indústria 4.0, a Indústria 5.0 mostra uma transformação mais sistêmica que inclui inovações empresariais que impulsionam a transição para uma indústria sustentável, centrada no ser humano e resiliente [9].
A Literature Review of the Challenges and Opportunities of the Transition from Industry 4.0 to Society 5.0	D. Mourtzis, J. Angelopoulos, N. Panopoulos	2022	A Indústria 4.0 concentrou-se na melhoria dos sistemas de produção, mas a Indústria 5.0 dará prioridade ao design centrado no ser humano e à sustentabilidade, levando ao surgimento da Sociedade 5.0, e esta investigação fornece um quadro para a transição [10].
Sustainable Manufacturing 4.0: Pathways and Practices	H. Gholami, F. Abu, Jocelyn Ke Yin Lee, S. Karganroudi, S. Sharif	2021	Assim, foi apresentada uma agenda de investigação inicial para esta área emergente, que pode abrir caminho para uma visão futurista da Fabricação Sustentável 5.0 na próxima onda industrial, ou seja, a Indústria 5.0 [11].
From Supply Chain 4.0 to Supply Chain 5.0: Findings from a Systematic Literature Review and Research Directions	G. Frederico	2021	A liderança das organizações, os decisores políticos e outros profissionais envolvidos nas cadeias de abastecimento, e principalmente aqueles que trabalham atualmente com iniciativas da Indústria 4.0, podem beneficiar desta investigação ao terem orientações claras sobre as dimensões necessárias para conceber e implementar estruturalmente uma estratégia da Indústria 5.0 [12].
Formation and Management of Industry 5.0 by Systems with Artificial Intelligence and Technological Singularity	E. Bryndin	2020	A formação e gestão da Indústria 5.0 podem ser alcançadas através do uso de mente tecnológica cognitiva, conjuntos de agentes intelectuais e duplos digitais, que podem ser controlados por inteligência artificial com singularidade tecnológica, e podem se tornar um bom auxiliar da humanidade no desenvolvimento seguro de espaços de convivência [13].
Industry 5.0: A Human-Centric Solution	S. Nahavandi	2019	Finalmente, o impacto da Indústria 5.0 na indústria transformadora e na economia em geral é discutido do ponto de vista económico e de produtividade, onde se argumenta que a Indústria 5.0 criará mais empregos do que eliminará [14].

Fonte: Do autor

3. INDÚSTRIA 5.0:



O termo "Indústria 5.0" denota a quinta grande mudança no paradigma dos processos de fabricação e industriais. Diferente de sua predecessora, a Indústria 4.0, que se centrava na integração das tecnologias digitais, automação e sistemas interconectados, a Indústria 5.0 coloca um foco pronunciado na colaboração entre humanos e sistemas inteligentes, visando aproveitar o melhor de ambos os mundos [15].

Origens: A evolução dos processos industriais testemunhou uma série de mudanças revolucionárias, começando com a Indústria 1.0 no final do século XVIII, que girava em torno da mecanização com energia de água e vapor. Isso foi seguido pela Indústria 2.0 com a introdução da eletricidade e o conceito de produção em massa. A terceira onda, Indústria 3.0, emergiu com a chegada dos computadores e automação. A quarta fase, Indústria 4.0, marcou a transformação digital da manufatura através do uso da Internet das Coisas (IoT), big data e computação em nuvem.

À medida que as capacidades das máquinas e da IA aumentavam, surgiu a percepção de que, enquanto a tecnologia poderia lidar eficientemente com tarefas complexas, o valor da engenhosidade, criatividade e pensamento crítico humano permaneciam inigualáveis. Isso levou à ideia por trás da Indústria 5.0: criar um espaço de trabalho onde as máquinas ampliam as capacidades humanas em vez de substituí-las.

Onde Se Encontra Hoje: Atualmente, a Indústria 5.0 está em seus estágios iniciais de desenvolvimento e implementação. Muitas indústrias estão pesquisando ativamente e desenvolvendo estratégias que aproveitam tanto a expertise humana quanto os avanços tecnológicos em harmonia. A chave para essa colaboração reside na criação de sistemas que entendem as intenções e emoções humanas, abrindo caminho para a "cobótica", onde robôs trabalham lado a lado com humanos de forma integrada. "Cobótica" refere-se à colaboração entre humanos e robôs no ambiente de trabalho. O termo é uma fusão de "colaborativo" e "robótica". Os "cobots", ou robôs colaborativos, são projetados para trabalhar ao lado de humanos, auxiliando em tarefas diversas, de maneira segura e eficiente, diferentemente dos robôs industriais tradicionais que, geralmente, operam de forma autônoma e em espaços separados dos trabalhadores humanos.[16] Os cobots são equipados com sensores, câmeras e outros dispositivos tecnológicos para perceberem seu ambiente e interagirem com humanos de maneira segura. Eles são utilizados em diversas indústrias, como manufatura, saúde e serviços, para aumentar a eficiência e aliviar os trabalhadores humanos de tarefas repetitivas, perigosas ou desgastantes.

A cobótica é uma área de foco na Indústria 4.0 e continua a evoluir na direção da Indústria 5.0, onde a harmonização entre habilidades humanas e tecnologias avançadas é central. A integração de cobots no ambiente de trabalho visa otimizar a produção, reduzir erros e melhorar a segurança e a satisfação no trabalho [17].

Além disso, há uma crescente ênfase na sustentabilidade e no uso responsável dos recursos na Indústria 5.0. A ideia não é apenas tornar a fabricação mais eficiente, mas também mais ética e ecologicamente correta. Isso representa uma abordagem holística da produção, que considera não apenas o aspecto econômico, mas também as implicações sociais e ambientais. Em conclusão, a Indústria 5.0 anuncia uma nova era onde a tecnologia serve como uma extensão das capacidades humanas, promovendo a criatividade, personalização e sustentabilidade. À medida que indústrias ao redor do mundo começam a integrar esses princípios, podemos esperar um futuro de manufatura que seja ao mesmo tempo tecnologicamente avançado e centrado no ser humano.

4. GESTÃO 5.0:



A Gestão 5.0 é um conceito emergente que visa transformar as práticas tradicionais de gerenciamento para se alinhar com as demandas e oportunidades da Indústria 5.0. Enquanto a Indústria 5.0 se concentra na colaboração entre humanos e sistemas inteligentes no chão de fábrica, a Gestão 5.0 se aprofunda na harmonização desse relacionamento no domínio da tomada de decisões estratégicas e operacionais.

“A gestão 5.0 é uma abordagem de gerenciamento que se concentra em um modelo de negócios sustentável, centrado no ser humano e na tecnologia”.

Pois, será uma nova forma de pensar sobre gestão que enfatiza a inovação, a colaboração e a criação de valor em um ambiente de constante mudança. Em suma, a gestão 5.0 é uma evolução da gestão 4.0, que se concentra na automação e digitalização dos processos de negócios. Enquanto a gestão 4.0 é baseada em tecnologias como a Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial (IA) e blockchain, a gestão 5.0 adiciona uma abordagem mais humana e colaborativa à equação.

4.1 AQUI ESTÃO ALGUNS DOS PRINCIPAIS ASPECTOS DA GESTÃO 5.0:

A Gestão 5.0 refere-se à próxima evolução nos modelos de gestão, caracterizando-se pelo uso intensivo de tecnologias avançadas e por uma abordagem mais humana e sustentável aos negócios. Aqui estão alguns dos principais aspectos da Gestão 5.0:

4.1.1 CENTRALIDADE NO SER HUMANO:

- **Foco no Indivíduo:** Valoriza as habilidades humanas e promove um ambiente de trabalho mais inclusivo e diversificado.
- **Bem-estar e Satisfação:** Busca promover a qualidade de vida e a satisfação dos colaboradores no ambiente de trabalho.
- **Foco nas Pessoas e Tecnologia:** Ao contrário das abordagens anteriores que tendiam a priorizar ou pessoas ou tecnologia, a Gestão 5.0 enfatiza uma simbiose entre os dois. Ela reconhece que, enquanto a tecnologia pode trazer eficiência e insights, a intuição humana, a criatividade e o pensamento crítico são insubstituíveis.

4.1.2 SUSTENTABILIDADE E RESPONSABILIDADE SOCIAL:

- **Desenvolvimento Sustentável:** Adota práticas empresariais sustentáveis e responsáveis.
- **Impacto Social Positivo:** Visa à criação de valor compartilhado, beneficiando a sociedade e o meio ambiente.
- **Ética:** Com um crescente reconhecimento das responsabilidades sociais e ambientais, a Gestão 5.0 enfatiza práticas sustentáveis e éticas em todas as operações.

4.1.3 TECNOLOGIA E INOVAÇÃO:

- **Inteligência Artificial e Big Data:** Utiliza tecnologias avançadas para análise de dados e tomada de decisão.
- **Tomada de Decisão Baseada em Dados:** Com o aumento da IoT e de sistemas analíticos avançados, os gestores têm acesso a um volume de dados sem precedentes. A Gestão 5.0 visa aproveitar esses dados para tomada de decisões mais informadas e ágeis.
- **Inovação Contínua:** Fomenta a criatividade e a inovação em produtos, serviços e processos.

4.1.4 LIDERANÇA E CULTURA ORGANIZACIONAL:

- **Liderança Inspiradora:** Desenvolve líderes capazes de inspirar e engajar as equipes.
- **Liderança Adaptativa:** Em um mundo em constante mudança, os líderes devem ser flexíveis e adaptáveis. A Gestão 5.0 promove uma liderança que está aberta a mudanças, aprendizado contínuo e que prioriza a escuta ativa.
- **Cultura de Aprendizagem:** Promove uma cultura organizacional de aprendizado contínuo e desenvolvimento.

4.1.5 OPERAÇÕES ENXUTAS E EFICIENTES:

- **Eficiência Operacional:** Busca otimizar processos, eliminando desperdícios e aumentando a eficiência.
- **Flexibilidade:** Adapta-se rapidamente a mudanças, atendendo às demandas do mercado de forma ágil.

4.1.6 FOCO NO CLIENTE:

- **Experiência do Cliente:** Prioriza a entrega de valor e uma experiência superior ao cliente.
- **Personalização:** Oferece produtos e serviços personalizados, atendendo às necessidades específicas dos clientes.

4.1.7 DESENVOLVIMENTO DE TALENTOS:

- **Capacitação Contínua:** Investe no desenvolvimento e na capacitação dos colaboradores.
- **Retenção de Talentos:** Implementa estratégias para reter os melhores talentos.

4.1.8 ADAPTABILIDADE E RESILIÊNCIA:

- **Gestão de Mudanças:** Prepara a organização para adaptar-se a um ambiente de negócios em constante mudança.
- **Resiliência Organizacional:** Desenvolve a capacidade da organização de superar adversidades.

4.1.9 ESTRATÉGIA E VISÃO DE FUTURO:

- **Visão de Longo Prazo:** Desenvolve estratégias sustentáveis e com visão de futuro.
- **Proatividade:** Antecipa tendências e se prepara para os desafios futuros.

4.2 SOCIEDADE 5.0



Sociedade 5.0 é uma proposta de “*modelo de organização social*” em que tecnologias como big data, inteligência artificial e internet das coisas (IoT) são usadas para criar soluções com foco nas necessidades humanas. Esse modelo busca prover os serviços necessários para o bem-estar a qualquer hora, em qualquer lugar e para qualquer pessoa. Isso acontece graças ao planejamento de cidades totalmente conectadas, nas quais o ciberespaço se integra de maneira harmônica com o mundo físico.

O conceito de sociedade 5.0 foi definido pelo ex-primeiro-ministro do Japão, Shinzo Abe, na feira de computadores CeBIT 2017 em Hannover, Alemanha. Ele disse que a sociedade 5.0 é uma “sociedade superinteligente” que integra o mundo físico e o ciberespaço, utilizando as tecnologias da quarta revolução industrial, como a inteligência artificial, a internet das coisas, a robótica, a big data e a computação em nuvem.

Segundo Abe, a sociedade 5.0 visa resolver os problemas sociais e econômicos, como o envelhecimento da população, a desigualdade, a poluição, a escassez de recursos e a segurança, por meio da inovação tecnológica e da colaboração entre os setores público e privado. Ele afirmou que o Japão estava pronto para liderar esse movimento, com sua criatividade e espírito pioneiro.

Esses aspectos trabalham em conjunto para criar organizações mais resilientes, inovadoras, éticas e prósperas, capazes de navegar pela complexidade do mundo contemporâneo e contribuir para o bem-estar da sociedade.

5. INDÚSTRIA DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA: PANORAMA GLOBAL, BRASIL E A INFLUÊNCIA DA INDÚSTRIA 5.0 E GESTÃO 5.0

Panorama Global: A indústria de conformação mecânica refere-se ao conjunto de processos utilizados para moldar e formar materiais, especialmente metais, em componentes de uso final ou intermediários. Globalmente, essa indústria tem desempenhado um papel crucial na manufatura, fornecendo peças e componentes essenciais para setores como automobilístico, aeroespacial, construção, entre outros.

Com a ascensão da Indústria 5.0, vemos uma crescente incorporação de sistemas inteligentes e automação nos processos de conformação mecânica. Robôs colaborativos, por exemplo, estão sendo usados para auxiliar na conformação de peças complexas, enquanto sistemas de visão computacional garantem a qualidade e precisão das peças produzidas.

Panorama no Brasil: No Brasil, a indústria de conformação mecânica tem uma presença significativa, principalmente devido ao robusto setor automobilístico e à demanda por infraestrutura e maquinário. Contudo, a indústria brasileira tem enfrentado desafios, como a necessidade de modernização e a concorrência internacional.

A adoção de conceitos da Indústria 5.0 ainda está em progresso no país. Algumas empresas líderes estão adotando tecnologias avançadas, como IoT e manufatura aditiva, mas a penetração em todo o setor ainda é heterogênea. O investimento em tecnologia, no entanto, é visto como essencial para manter a competitividade no cenário global.

Influência da Indústria 5.0 e Gestão 5.0: Os princípios da Indústria 5.0, com foco na colaboração homem-máquina, estão redefinindo a conformação mecânica. A customização em massa, por exemplo, tornou-se mais viável, permitindo que as empresas produzam peças sob medida em larga escala.

A Gestão 5.0, por sua vez, está influenciando a maneira como essas operações são geridas. A ênfase em dados, análise em tempo real e decisões ágeis está permitindo uma produção mais eficiente e responsiva. Em suma, tanto no cenário global quanto no Brasil, a indústria de conformação mecânica está em uma encruzilhada de inovação e transformação. A integração bem-sucedida dos princípios da Indústria 5.0 e Gestão 5.0 será determinante para as empresas que desejam prosperar na próxima década.

6. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para entender quais serão os impactos na Indústria de conformação mecânica, a criação de um framework de pesquisa com a seguinte metodologia está sendo proposta.

A seguir demonstrarei via um mapa mental na figura 01 que estruturará o projeto em suas várias etapas, detalhando as atividades e subatividades que ocorrem em cada fase. O uso de um mapa mental visual poderá facilitar ainda mais o entendimento do processo e das inter-relações entre as diversas etapas e atividades.

Figura 01 – Procedimentos metodológicos



Fonte: Do autor

6.1 METODOLOGIA DE CRIAÇÃO DO FRAMEWORK PARA PESQUISA: IMPACTOS NA INDÚSTRIA DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA

A metodologia de criação de do framework está melhor detalhada a seguir:

1. Identificação da Necessidade e Justificativa

- Reconhecer a lacuna de conhecimento ou a necessidade de entender os impactos da Indústria 5.0 e da Gestão 5.0 na indústria de conformação mecânica.
- Avaliar os desafios e oportunidades associados a essa transformação industrial e gerencial.

2. Revisão Bibliográfica e Benchmarking

- 2.1 Realizar uma extensa pesquisa em bases de dados acadêmicas, publicações industriais e estudos de caso relacionados à Indústria 5.0, Gestão 5.0 e conformação mecânica.
- 2.2 Identificar práticas exemplares, desafios enfrentados e soluções propostas em diferentes contextos industriais.

3. Consulta a Especialistas e Stakeholders

- 3.1 Organizar entrevistas, painéis de discussão ou workshops com profissionais, acadêmicos e líderes industriais para coletar insights sobre os impactos percebidos e projetados.
- 3.2 Priorizar a obtenção de visões diversificadas para garantir uma compreensão abrangente do cenário.

4. Desenvolvimento do Framework Preliminar

- 4.1 Estruturar as informações coletadas em categorias lógicas e hierárquicas, como adoção atual, impactos atuais, previsões, desafios, entre outros.
- 4.2 Desenvolver métricas ou indicadores associados a cada categoria para avaliação quantitativa e qualitativa.

5. Validação e Feedback

- 5.1 Submeter o framework preliminar a uma revisão por pares, incluindo especialistas no campo.
- 5.2 Integrar o feedback e refinar o framework para melhor precisão, relevância e aplicabilidade.

6. Implementação e Teste Piloto

- 6.1 Escolher algumas organizações ou cenários na indústria de conformação mecânica para testar o framework.
- 6.2 Coletar e analisar os dados, observando as facilidades e dificuldades encontradas, bem como a relevância dos insights gerados.

7. Refinamento e Iteração

- 7.1 Baseado nas descobertas do teste piloto, será feito os ajustes necessários no framework.
- 7.2 Repetir o processo de teste e refinamento conforme necessário, garantindo que o framework permaneça relevante e adaptável a diferentes contextos da indústria de conformação mecânica.

8. Documentação e Disseminação

8.1 Documentar o framework finalizado, detalhando suas seções, métricas e métodos de aplicação.

8.2 Disseminar o framework através de publicações, apresentações e workshops para promover sua adoção e coletar feedback contínuo da comunidade industrial.

9. Revisão e Atualização Periódica

9.1 Monitorar continuamente as tendências e desenvolvimentos na Indústria 5.0, Gestão 5.0 e na indústria de conformação mecânica.

9.2 Revisar e atualize o framework regularmente para garantir sua relevância e utilidade em face das mudanças dinâmicas do setor.

Ao adotar esta metodologia, entendemos que estaremos se posicionando para desenvolver um framework de pesquisa robusto e adaptável que pode fornecer insights valiosos sobre os impactos da Indústria 5.0 e da Gestão 5.0 na indústria de conformação mecânica.

6.2 FRAMEWORK DE PESQUISA: IMPACTOS NA INDÚSTRIA DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA



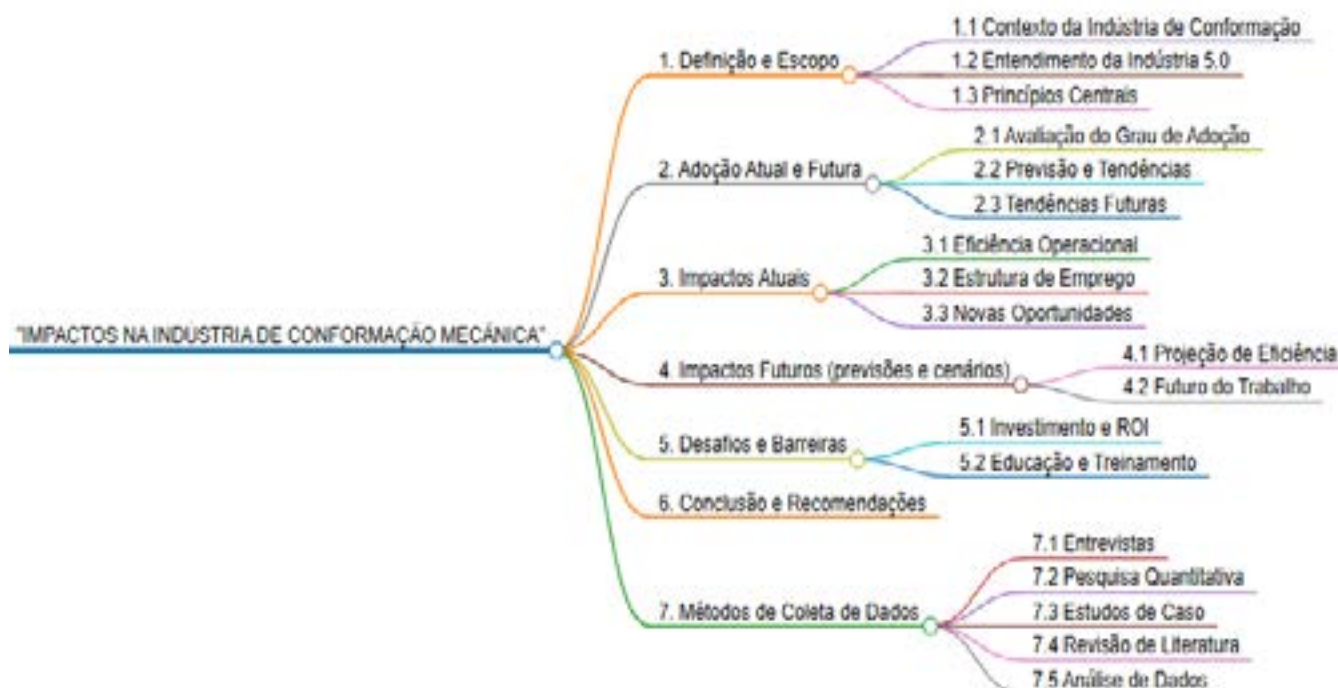
Um framework para pesquisa refere-se a uma estrutura, modelo ou conceito que proporciona um contexto ou esquema para organizar e interpretar informações durante uma investigação científica ou acadêmica. Este framework serve como um guia para o desenvolvimento do desenho da pesquisa, a coleta de dados, a análise e a interpretação dos resultados.

Após a definição da metodologia, para verificar quais os impactos da indústria 5.0 x Gestão 5.0 na indústria de conformação mecânica, o seguinte framework de pesquisa está aqui sendo proposto.

Este mapa mental refletirá a estrutura dos itens fornecidos, ilustrando como cada subitem se relacionará com os temas principais e entre si, fornecendo assim uma visão visual da organização e relação entre os tópicos do tema "INDÚSTRIA 5.0 X GESTÃO 5.0 – IMPACTOS NA INDÚSTRIA DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA". Terá como objetivo principal avaliar os impactos atuais e futuros da Indústria 5.0 e da Gestão 5.0 na indústria de conformação mecânica.

O mapa mental, figura 02 a seguir, visualmente organizará o framework de pesquisa, proporcionando uma visão clara dos componentes principais do estudo e seus subcomponentes.

Figura 02 – Framework de Pesquisa: Impactos na Indústria de Conformação Mecânica



Fonte: Do autor

Cada bloco representará uma seção principal do framework de pesquisa, e os blocos conectados abaixo de cada seção representam subseções ou tópicos dentro da seção principal. A seguir segue a descrição detalhada de cada etapa da pesquisa.

1. Definição e Escopo

- Contextualização da indústria de conformação mecânica.
- Entendimento da Indústria 5.0 e da Gestão 5.0 e seus princípios centrais.

2. Adoção Atual e Futura

- 2.1 Avaliação do grau de adoção atual da Indústria 5.0 e da Gestão 5.0 na conformação mecânica.
- 2.2 Previsões e tendências para a adoção futura destes conceitos no setor.

3. Impactos Atuais

- 3.1 Análise da eficiência operacional: Mudanças nos tempos de produção, redução de desperdícios, etc.
- 3.2 Alterações na estrutura de emprego: Novas competências necessárias, treinamento, mudanças em cargos e funções.
- 3.3 Novas oportunidades de mercado e desenvolvimento de produtos: Customização em massa, rapidez na prototipação, etc.
- 3.4 Impacto ambiental e sustentabilidade: Redução de desperdício, uso eficiente de recursos.

4. Impactos Futuros (previsões e cenários)

- 4.1 Projeção de eficiência e automação: Onde a conformação mecânica poderia chegar com a total adoção da Indústria 5.0.
- 4.2 Futuro do trabalho: Como a robotização e automação podem alterar o perfil de emprego na indústria.
- 4.3 Inovação e desenvolvimento de produtos: Explorando as possibilidades de integração entre design, produção e entrega.
- 4.4 Sustentabilidade e responsabilidade: Como as futuras práticas podem alinhar a produção com os objetivos de sustentabilidade global.

5. Desafios e Barreiras

- 5.1 Investimento inicial e ROI: Custos associados à implementação da Indústria 5.0 e da Gestão 5.0.
- 5.2 Educação e treinamento: Necessidades e desafios para preparar a força de trabalho atual e futura.
- 5.3 Integração de sistemas e interoperabilidade: Desafios técnicos para a implementação plena.
- 5.4 Regulamentações e conformidade: Implicações legais e de segurança na adoção de novas tecnologias.

6. Conclusão e Recomendações

- 6.1 Sumarização dos principais impactos identificados.
- 6.2 Recomendações estratégicas para empresas no setor de conformação mecânica.
- 6.3 Áreas propostas para pesquisa e desenvolvimento futuro.

7. Métodos de Coleta de Dados:

- 7.1 Entrevistas Qualitativas: Engajar líderes e profissionais do setor para obter insights.
- 7.2 Pesquisa Quantitativa: Questionários e pesquisas para coletar dados em larga escala sobre adoção, percepções e impactos.
- 7.3 Estudos de Caso: Análise profunda de empresas que já estão adotando ou experimentando a Indústria 5.0 e a Gestão 5.0.
- 7.4 Revisão de Literatura: Exploração de estudos, pesquisas e publicações existentes relacionados ao tema.

Este framework poderá servir como um ponto de partida para uma análise mais detalhada, adaptando-se conforme as necessidades específicas do pesquisador ou da organização.

7. VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÃO

A implementação de um framework de pesquisa robusto e adaptável para analisar os impactos da Indústria 5.0 e da Gestão 5.0 na indústria de conformação mecânica poderá ter um potencial de gerar uma variedade de resultados significativos e insights profundos. Aqui estão os principais resultados esperados:

7.1 Compreensão Aprofundada:

- Desenvolver um entendimento claro e detalhado das nuances e implicações da Indústria 5.0 e Gestão 5.0 na indústria de conformação mecânica.
- Identificar como essas novas paradigmas podem remodelar as operações, processos e a cultura organizacional.

7.2 Identificação de Oportunidades e Desafios:

- Mapear oportunidades de inovação e crescimento propiciadas pela adoção dessas novas abordagens.
- Identificar os principais desafios e barreiras à implementação e propor soluções viáveis para superá-los.

7.3 Análise de Impacto:

- Avaliar o impacto da integração da tecnologia e novas práticas de gestão nas operações e resultados da indústria.
- Analisar as implicações a longo prazo desses avanços para a sustentabilidade e competitividade do setor.

7.4 Estratégias de Implementação:

- Desenvolver estratégias eficientes e práticas recomendadas para implementar inovações tecnológicas e gerenciais de maneira bem-sucedida.
- Propor modelos de transição e adaptação para facilitar a integração de novas práticas e tecnologias no ambiente existente.

7.5 Desenvolvimento de Competências:

- Identificar as competências essenciais necessárias para operar eficientemente dentro desses novos paradigmas.
- Fornecer diretrizes para o desenvolvimento de habilidades e conhecimentos necessários para a força de trabalho.

7.6 Benchmarking e Best Practices:

- Compilar uma série de melhores práticas e benchmarks de sucesso na adoção da Indústria 5.0 e Gestão 5.0.
- Proporcionar um comparativo de desempenho entre diferentes abordagens e estratégias de implementação.

7.7 Medição e Avaliação de Desempenho:

- Estabelecer métricas e KPIs claros para avaliar o desempenho e os resultados das inovações implementadas.
- Analisar a eficácia das soluções adotadas e fazer ajustes e otimizações conforme necessário.

7.8 Fomento à Inovação e Pesquisa:

- Fomentar um ambiente de inovação contínua e incentivar a pesquisa e o desenvolvimento em áreas relacionadas à Indústria 5.0 e Gestão 5.0.
- Estimular a colaboração entre academia, indústria e outros stakeholders para impulsionar a inovação e o avanço do conhecimento.

Cada um destes resultados proporcionará uma base sólida para a tomada de decisões informadas, permitindo a criação de valor sustentável e o aprimoramento contínuo na indústria de conformação mecânica no contexto da Indústria 5.0 e Gestão 5.0.

A implementação de um framework de pesquisa robusto poderá permitir uma visão integral dos múltiplos aspectos envolvidos na transição para a Indústria 5.0 e Gestão 5.0. As conclusões derivadas poderão, por sua vez, fornecer insights acionáveis para aprimorar a prática, informar políticas, e guiar futuras pesquisas, contribuindo para a resiliência, sustentabilidade e competitividade da indústria de conformação mecânica no contexto da quinta revolução industrial.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] MACHADO, Carolina Feliciano; DAVIM, João Paulo (ed.). **Industry 5.0: creative and innovative organizations**. Braga: Springer Nature Switzerland Ag 2023, 2023. 159 p. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-26232-6>.

[2] Doyle-Kent, M., Kopacek, P. (2020). Industry 5.0: Is the Manufacturing Industry on the Cusp of a New Revolution? In: Durakbasa, N., Gençyılmaz, M. (eds) Proceedings of the International Symposium for Production Research 2019. ISPR ISPR 2019 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-31343-2_38.

[3] Sebastian Saniuk, Sandra Grabowska e Mochammad Fahlev. **Industry 5.0**. Chapter. Personalization of Products and Sustainable Production and Consumption in the Context of Industry 5.0.

[4] Zhang, J. J., Wang, F. Y., Wang, X., Xiong, G., Zhu, F., Lv, Y., Hou, J., Han, S., Yuan, Y., Lu, Q., & Lee, Y. (2018). Cyber-physical-social systems: The state of the art and perspectives. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 5(3), 829–840. <https://doi.org/10.1109/TCSS.2018.2861224>.

[5] Popkova, E.G. (2023). Big Data: A System-Forming Role in the Development of the Information Society and the Digital Economy for the Transition to Industry 5.0. In: Bogoviz, A.V. (eds) Big Data in Information Society and Digital Economy. Studies in Big Data, vol 124. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-29489-1_1.

[6] Tariq, M.U. (2022). Role of Industry 4.0 in Maintaining Sustainable Production and Services. In: Hussain, C.M., Di Sia, P. (eds) Handbook of Smart Materials, Technologies, and Devices. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-84205-5_18.

- [7] MADSEN, Dag Øivind; SLÄTTEN, Kåre. Comparing the Evolutionary Trajectories of Industry 4.0 and 5.0: a management fashion perspective. **Applied System Innovation**, [S.L.], v. 6, n. 2, p. 48, 30 mar. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/asi6020048>.
- [8] HASSOUN, Abdo; AÏT-KADDOUR, Abderrahmane; ABU-MAHFOUZ, Adnan M.; RATHOD, Nikheel Bhojraj; BADER, Farah; BARBA, Francisco J.; BIANCOLILLO, Alessandra; CROPOTOVA, Janna; GALANAKIS, Charis M.; JAMBRAK, Anet Režek. The fourth industrial revolution in the food industry—Part I: industry 4.0 technologies. **Critical Reviews In Food Science And Nutrition**, [S.L.], v. 63, n. 23, p. 6547-6563, 3 fev. 2022. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10408398.2022.2034735>.
- [9] BORCHARDT, Miriam; PEREIRA, Giancarlo M.; MILAN, Gabriel S.; SCAVARDA, Annibal R.; NOGUEIRA, Edithe O.; POLTOSI, Leonel C. Industry 5.0 Beyond Technology: an analysis through the lens of business and operations management literature. **Organizacija**, [S.L.], v. 55, n. 4, p. 305-321, 1 nov. 2022. Walter de Gruyter GmbH. <http://dx.doi.org/10.2478/orga-2022-0020>.
- [10] MOURTZIS, Dimitris; ANGELOPOULOS, John; PANOPOULOS, Nikos. A Literature Review of the Challenges and Opportunities of the Transition from Industry 4.0 to Society 5.0. **Energies**, [S.L.], v. 15, n. 17, p. 6276, 28 ago. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en15176276>.
- [11] GHOLAMI, Hamed; ABDUL-NOUR, Georges; SHARIF, Safian; STREIMIKIENE, Dalia (ed.). Topics: Industrial and Production Engineering, Industrial Chemistry/Chemical Engineering, Engineering Design: pathways and practices. **Sustainable Manufacturing In Industry 4.0**, [S.L.], v. 1, p. 1-212, 02 jan. 2023. Anual. Springer Nature Singapore. <http://dx.doi.org/10.1007/978-981-19-7218-8>. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-19-7218-8>. Acesso em: 11 mar. 2023.
- [12] FREDERICO, Guilherme F.. From Supply Chain 4.0 to Supply Chain 5.0: findings from a systematic literature review and research directions. **Logistics**, [S.L.], v. 5, n. 3, p. 49, 9 jul. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/logistics5030049>.
- [13] FORMATION AND MANAGEMENT OF INDUSTRY 5.0 BY SYSTEMS WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND TECHNOLOGICAL SINGULARITY. Russia: American Journal Of Mechanical And Industrial Engineering, v. 1, n. 1, 28 jul. 2020. Issn: 2575-6079 (Print); Issn: 2575-6060 (Online). Disponível em: <http://www.sciencepublishinggroup.com/j/ajmie>. Acesso em: 22 mar. 2023.
- [14] NAHAVANDI, Saeid. Industry 5.0—A Human-Centric Solution. **Sustainability**, [S.L.], v. 11, n. 16, p. 4371, 13 ago. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su11164371>.
- [15] Alexa, L., Pîslaru, M., Avasilcăi, S. (2022). From Industry 4.0 to Industry 5.0: An Overview of European Union Enterprises. In: Draghici, A., Ivascu, L. (eds) Sustainability and Innovation in Manufacturing Enterprises. *Advances in Sustainability Science and Technology*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7365-8_8.
- [16] Faccio, M., Cohen, Y. Intelligent cobot systems: human-cobot collaboration in manufacturing. *J Intell Manuf* (2023). <https://doi.org/10.1007/s10845-023-02142-z>.
- [17] Storm, F.A. et al. (2023). Quality of Experience and Mental Energy Use of Cobot Workers in Manufacturing Enterprises. In: Duffy, V.G. (eds) *Digital Human Modeling and Applications in Health, Safety, Ergonomics and Risk Management. HCII 2023. Lecture Notes in Computer Science*, vol 14028. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35741-1_33.



42nd S E N A F O R
26th International Forging Conference
25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming
Conference / 9th BrDDRG Congress
12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS
October 4-6, 2023

ANÁLISE COMPUTACIONAL DO MÉTODO POLAKOWSKI PARA O ENSAIO DE COMPRESSÃO A FRIO DE METAIS SEM O EFEITO DE ATRITO ENTRE O MATERIAL E AS MATRIZES

Olavo Carvalho Haase ⁽¹⁾
Adriano Amâncio Trajano ⁽²⁾
Alisson Duarte da Silva ⁽³⁾
Maria Teresa Paulino Aguilár ⁽⁴⁾
Paulo Roberto Cetlin ⁽⁵⁾

RESUMO

Ensaio mecânico de materiais são essenciais para a obtenção de dados sobre seu comportamento, e tem ampla aplicabilidade científica e industrial. Dentre tais ensaios, a compressão apresenta vantagens por sua facilidade de realização e possibilidade de obtenção de propriedades para maiores deformações em relação ao ensaio de tração. Entretanto, a presença do atrito entre os corpos de prova e as matrizes de compressão introduz graves problemas relativos aos resultados obtidos. O método de ensaio proposto por Polakowski propõe uma técnica visando reduzir o efeito do atrito. Neste estudo, simulações computacionais de compressões desse método foram realizadas visando analisar sua adequação para a obtenção de curvas de fluxo de materiais condizentes com suas propriedades.

Palavras chave — Método dos Elementos Finitos, Ensaio Mecânico, Ensaio de Compressão, Método Polakowski.

- ⁽¹⁾ Mestrando em Engenharia Metalúrgica, Programa de pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Minas e Materiais, UFMG, Minas Gerais, Brasil, olavohaase@ufmg.br
⁽²⁾ Doutorando em Engenharia Mecânica, Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, UFMG, Minas Gerais, Brasil, adrianoatrajano@gmail.com
⁽³⁾ Prof. Dr.; Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, Brasil, alissonds@ufmg.br
⁽⁴⁾ Prof. Dr.; Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, Brasil, teresa@ufmg.br
⁽⁵⁾ Prof. Dr.; Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, Brasil, pcetlin@ufmg.br

ABSTRACT

Mechanical tests of materials are essential for obtaining data pertaining to their behavior and thus have wide scientific and industrial applicability. Among the various available mechanical tests, compression has advantages due to its ease of execution and the possibility of obtaining properties for higher deformations than under tension, for example. However, the presence of friction between the specimens and the compression dies introduces severe problems regarding the obtained results. Polakowski proposed a technique for the compression test in order to reduce this friction influence. This investigation presents computational simulations of compressions using the Polakowski Method in order to evaluate its adequacy for obtaining adequate material flow curves.

Key words — Finite Elements Method, Mechanical Tests, Compression Test, Polakowski Method.

1. INTRODUÇÃO

Os ensaios mecânicos dos metais são de grande importância para a determinação de suas propriedades mecânicas. Diante disso, os resultados obtidos devem ser reproduzíveis e os parâmetros utilizados nesses ensaios devem ser padronizados. Além disso, materiais podem ter propriedades que variam em diferentes condições de solicitação; portanto, as condições de ensaio escolhidas devem ser capazes de fornecer propriedades condizentes com a realidade da aplicação [1], [2].

Atualmente, o ensaio de tração é o mais amplamente utilizado na indústria por permitir a obtenção de propriedades em estado uniaxial de tensão, sem interferência de atrito, e permitir posterior relação da propriedade de resistência obtida com outros estados de tensão através da tensão efetiva de Von-Mises [3]. Entretanto, os resultados do ensaio de tração só são válidos até a deformação correspondente ao início da estrição, que raramente excede cerca de $\approx 0,3$ a $0,4$; após esse fenômeno não mais se tem um estado uniaxial de tensões e correções tais como a de Bridgman precisam ser aplicadas aos resultados obtidos [4].

O ensaio de compressão utilizando o recalque axial de corpos de prova cilíndricos é também largamente utilizado e apresenta vantagens como fácil realização, versatilidade de dimensões do tarugo inicial e permitir a obtenção de propriedades até deformações mais altas do que nos ensaios de tração. Entretanto, a compressão também não apresenta estado uniaxial de tensão; o atrito entre o corpo de prova e as matrizes leva ao efeito de “barrilamento” do corpo de prova, que provoca a imposição de tensões tri-axiais. Como consequência, observam-se aumentos significativos das tensões de compressão, tornando os resultados não representativos das propriedades do material [5], [6]. Uma variação comum do ensaio de compressão é a compressão em estado plano de deformação, utilizada por se assemelhar às condições de solicitação da laminação de chapas [5], [7], [8].

Visando permitir que o ensaio de compressão forneça curvas de fluxo adequadas para grandes intervalos de deformações, minimizando os efeitos do atrito e consequente “barrilamento” do corpo de prova, diferentes variações do método de ensaio têm sido propostas ao longo dos anos. Uma delas é devida a Rastagaev, em que dois recessos cilíndricos são usinados nas superfícies de contato do tarugo com as matrizes de compressão, onde são colocados um lubrificante para reduzir o atrito [5], [9], [10]. Uma variação do ensaio Rastagaev envolve tarugos em forma de anel com o interior repleto de lubrificante durante o ensaio [11].

O método de Rastagaev permite uma redução de altura de até $\approx 50\%$ no corpo de prova, mantendo as superfícies de contato entre o tarugo e as matrizes bem lubrificadas; duas ou três etapas de re-usinagem das cavidades nos corpos de prova permitem atingir uma redução total de altura de 90% com efeitos limitados do atrito [12]. Chen et al propuseram a utilização de um corpo de prova com formato hiperbólico para eliminar o efeito do atrito no ensaio de compressão, mas correções são ainda necessárias para obter-se a curva de fluxo do material [13].

O método proposto por Polakowski para reduzir o efeito do atrito no ensaio de compressão consiste em sucessivas compressões do corpo de prova até $\approx 25\%$ de redução de altura, com etapas de usinagem entre cada uma, em que se retira a região onde ocorreu “barrilamento” e se restaura a relação inicial altura/diâmetro do tarugo. A Figura 1 apresenta um esquema representativo do Método Polakowski, em que são apresentadas as etapas de compressão, intercaladas com etapas de usinagem. De acordo com esse autor, não seriam necessários cuidados especiais com relação ao atrito entre o corpo de prova e as matrizes de compressão. Resultados experimentais indicam que o método é eficiente para reduzir muito o efeito do atrito na curva de fluxo obtida [1]. Entretanto, variações experimentais são inevitáveis, de modo que o Método dos Elementos Finitos (MEF) se torna uma ferramenta valiosa para atestar a eficiência do método. Diante disso, esse estudo propôs avaliar simulações computacionais usando o Método Polakowski e comparar as curvas obtidas com a curva de entrada para essas simulações.

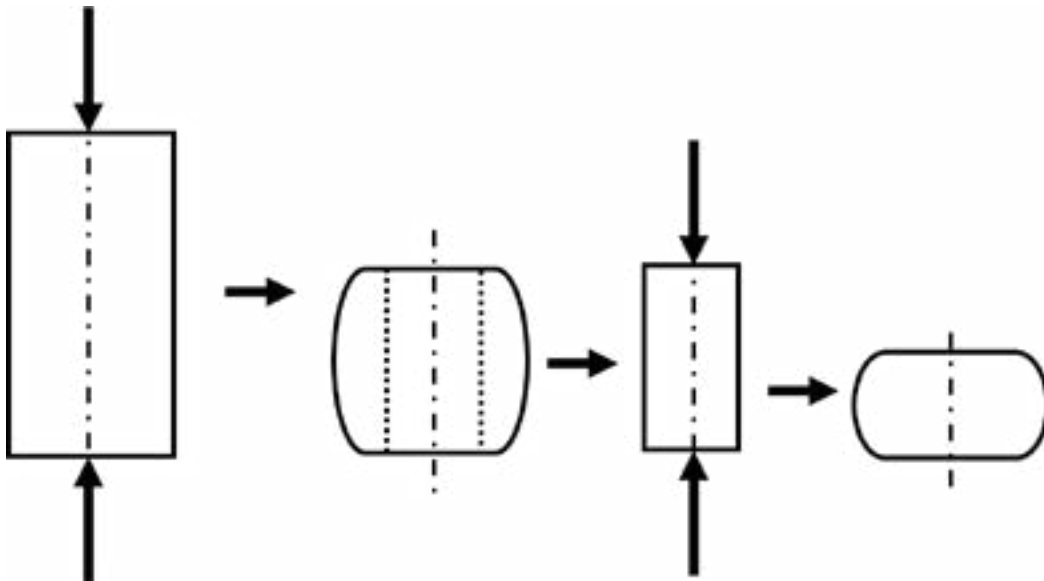


Figura 1: Esquema representando etapas de um ensaio de compressão pelo método Polakowski, mostrando uma compressão, seguida da usinagem do corpo de prova ao longo das linhas pontilhadas e mais uma compressão.

2. MÉTODOS

Realizaram-se simulações computacionais envolvendo o método dos elementos finitos utilizando o software QForm Cloud versão 10.2.0. Inicialmente foi conduzida uma simulação de compressão simples com atrito nulo, obtendo-se a curva de fluxo (tensão verdadeira versus deformação verdadeira) que deve ser idêntica à curva de fluxo do material fornecida ao QForm. A simulação considerou um recalque em ambiente axissimétrico de um tarugo cilíndrico de 25,4 mm (1 pol) de diâmetro por 60,96 mm de altura (relação altura/diâmetro de 2,4), com atrito nulo entre o tarugo e as ferramentas. O material escolhido para o tarugo foi o Alumínio 1100 retirado da biblioteca do software; a simulação foi conduzida em temperatura ambiente, as ferramentas foram consideradas rígidas e empregou-se a malha adaptativa padrão do QForm com 169 nós. A matriz superior deslocou-se com uma velocidade de 50 mm/s e a matriz inferior foi fixada; os processos térmicos foram desconsiderados e o material foi considerado como rígido-plástico. Foi necessário se utilizar um “time-step” máximo de 0,001 s para que se obtivessem resultados adequados. A Figura 2 apresenta o primeiro e o último “step” (para um deslocamento de 58,96 mm da matriz superior) da simulação de recalque com atrito 0.

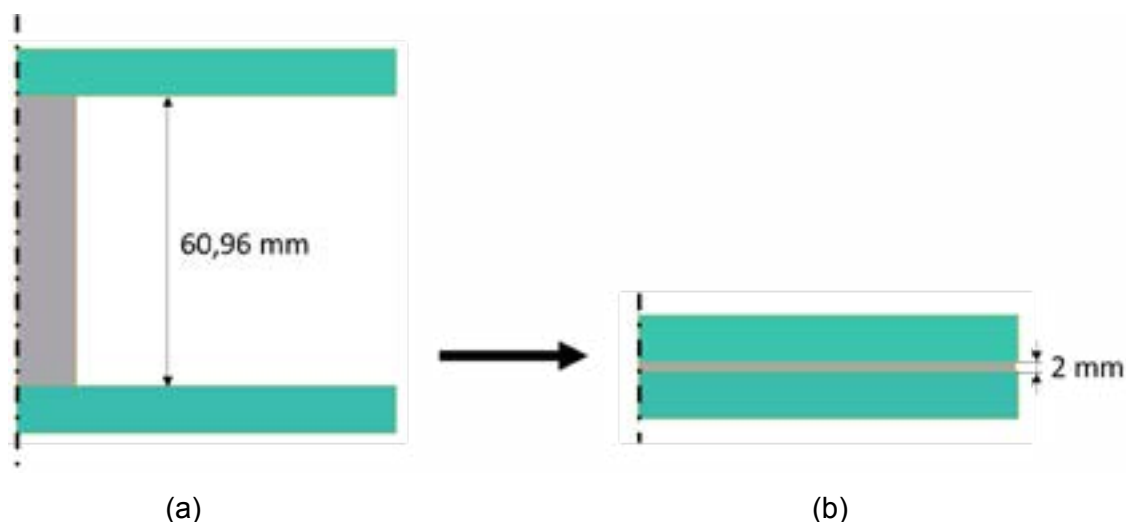


Figura 2: (a) Primeiro e (b) último step (deslocamento da matriz superior de 58,96 mm) de uma simulação de compressão completa com atrito nulo.

Em seguida, repetiram-se as simulações com atrito nulo, mas agora considerando o modelo de Coulomb para o atrito entre o corpo de prova e as matrizes de compressão com valores do coeficiente de atrito $\mu = 0,1$ e $\mu = 0,5$, e também utilizando o modelo de Siebel com fator de atrito $m = 1$. Por fim, foram realizadas simulações considerando o método Polakowski; para tal, os mesmos parâmetros das simulações anteriores foram considerados, exceto que a mesma foi dividida em operações subsequentes de recalque, entre as quais cortes numéricos foram efetuados nos corpos de prova para eliminar a região do tarugo onde ocorreu “barrilamento”, como ilustrado na Figura 1. As simulações com o método Polakowski consideraram 5 etapas de recalque, sendo a primeira com uma relação de altura/diâmetro inicial igual a 2,4 e as demais com essa relação igual a 2. As dimensões iniciais e as relações altura sobre diâmetro de cada operação estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Dimensões iniciais e relações altura/diâmetro de cada operação.

Operação	Altura - h (mm)	Diâmetro - d (mm)	Altura/Diâmetro - h/d
1	60,96	25,4	2,4
2	45,72	22,86	2
3	34,29	17,15	2
4	25,72	12,86	2
5	19,29	9,64	2

A Figura 3 apresenta as cinco operações de recalque (R1, R2, R3, R4 e R5) e os cortes (C1, C2, C3 e C4) entre cada uma delas para uma simulação usando o método Polakowski. Devido aos parâmetros escolhidos, foi possível atingir uma deformação verdadeira total nas curvas de fluxo extraídas de até 1,5. Para atingir maiores deformações, mais operações semelhantes às descritas seriam necessárias.

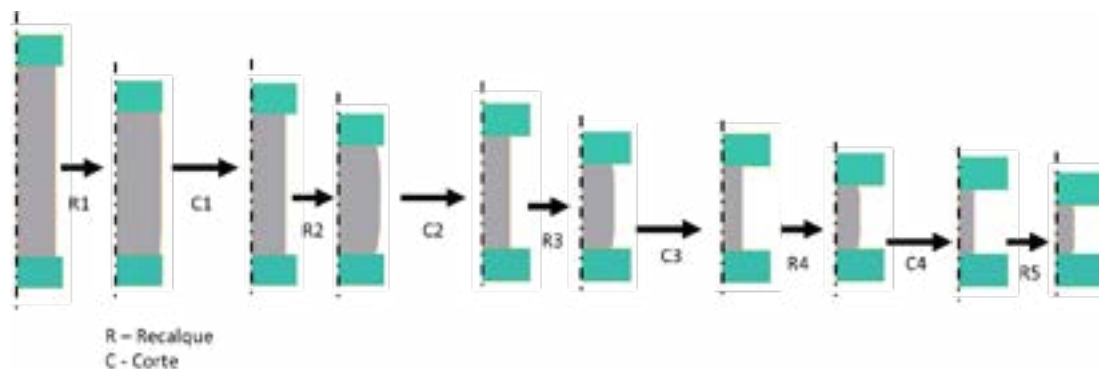


Figura 3: Etapas de uma simulação usando o método Polakowski, com recalques seguidos de cortes.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 apresenta os resultados das simulações do ensaio de compressão pelo método tradicional, com atrito nulo, Coulomb com $\mu = 0,1$ e $\mu = 0,5$ e Siebel com $m = 1$, até uma deformação de 1,5, que foi a máxima deformação total obtida utilizando o método de Polakowski.

A partir da Figura 4 é possível observar que a simulação de compressão considerando atrito nulo apresentou uma curva de fluxo resultante idêntica à curva de fluxo de entrada no QForm em toda a faixa de deformação considerada, confirmando a adequação da simulação realizada. Entretanto, as simulações considerando atrito diferente do nulo passaram a exibir resultados de curva de fluxo diferentes da curva de entrada a partir de uma deformação $\epsilon \approx 1,0$. A partir dessa deformação, a curva de fluxo obtida não mais representa adequadamente o comportamento do material. Além disso, o aumento do atrito entre o corpo de prova e as matrizes de compressão agrava essa falta de representatividade. A Figura 5 apresenta um “step” intermediário da simulação de compressão pelo método tradicional com atrito Coulomb $\mu = 0,5$, evidenciando o intenso efeito da “barrilamento” observado, responsável pelo aumento da tensão observado e que leva a um resultado não representativo da real propriedade do material a partir de determinada deformação.

A Figura 6 apresenta os resultados das simulações de ensaio de compressão pelo método tradicional, com atrito nulo, Coulomb $\mu = 0,1$ e $\mu = 0,5$ e Siebel $m = 1$, até uma deformação verdadeira total $\epsilon = 3,0$. É possível observar que o aumento da deformação leva a uma diferença cada vez maior entre os resultados obtidos para a curva de fluxo obtida e aquela descrevendo as propriedades de entrada, correspondendo ao atrito nulo entre o corpo de prova e as matrizes de forjamento.

A Figura 7 apresenta os resultados das curvas de fluxo obtidas pelas simulações usando o Método Polakowski; observa-se que as diversas curvas obtidas são bastante semelhantes, atestando a eficiência do método na redução do efeito do atrito sobre a curva de fluxo obtida. Observa-se também que diferentemente do método tradicional, as curvas não apresentam aumento significativo na tensão de fluxo, acima da curva de entrada. A eliminação da região do corpo de prova onde ocorreu o “barrilamento” através da usinagem numérica entre cada etapa de compressão permitiu eliminar o efeito prejudicial na curva de fluxo causado por esse fenômeno geométrico.

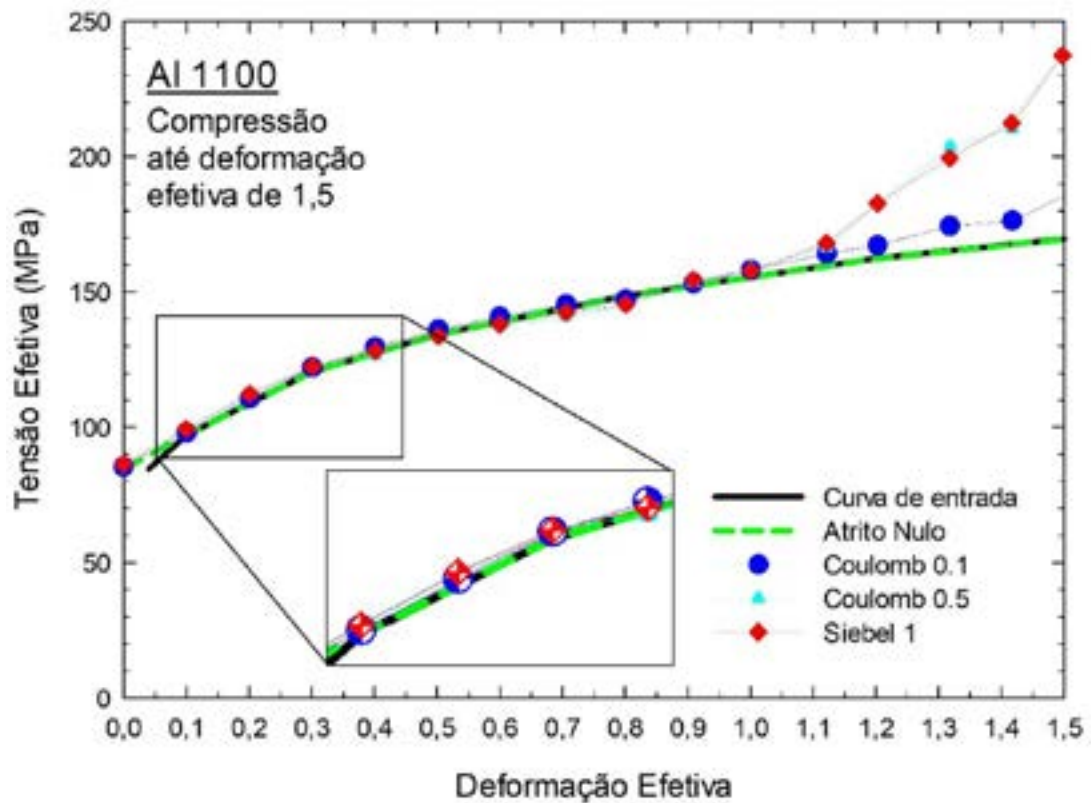


Figura 4: Curvas de fluxo obtidas para as simulações de compressão completa até deformação efetiva de 1,5 comparadas com a curva de entrada.

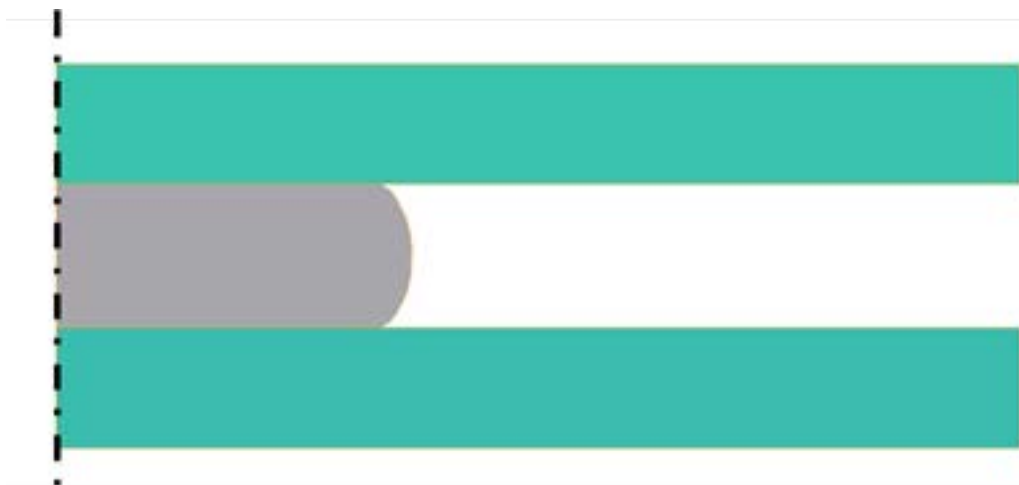


Figura 5: Step intermediário da simulação de compressão pelo método tradicional com atrito Coulomb $\mu = 0,5$, evidenciando o efeito de "barrilamento".

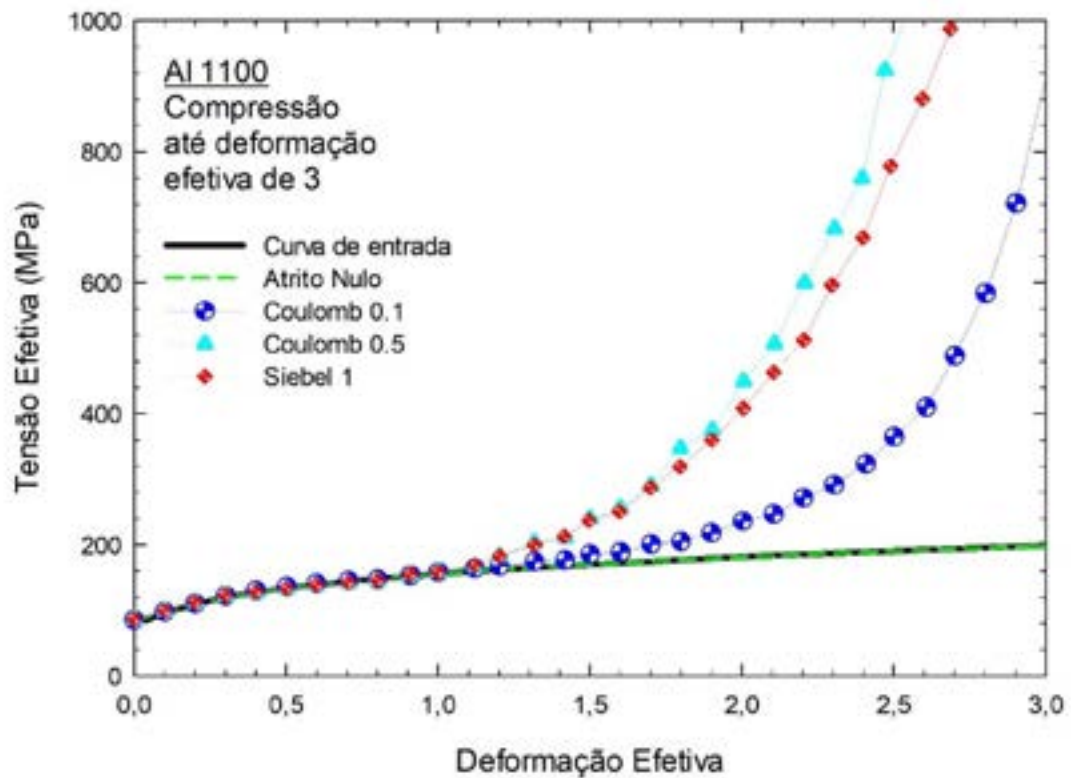


Figura 6: Curvas de fluxo obtidas para as simulações de compressão completa até deformação efetiva de 3 comparadas com a curva de entrada no QForm.

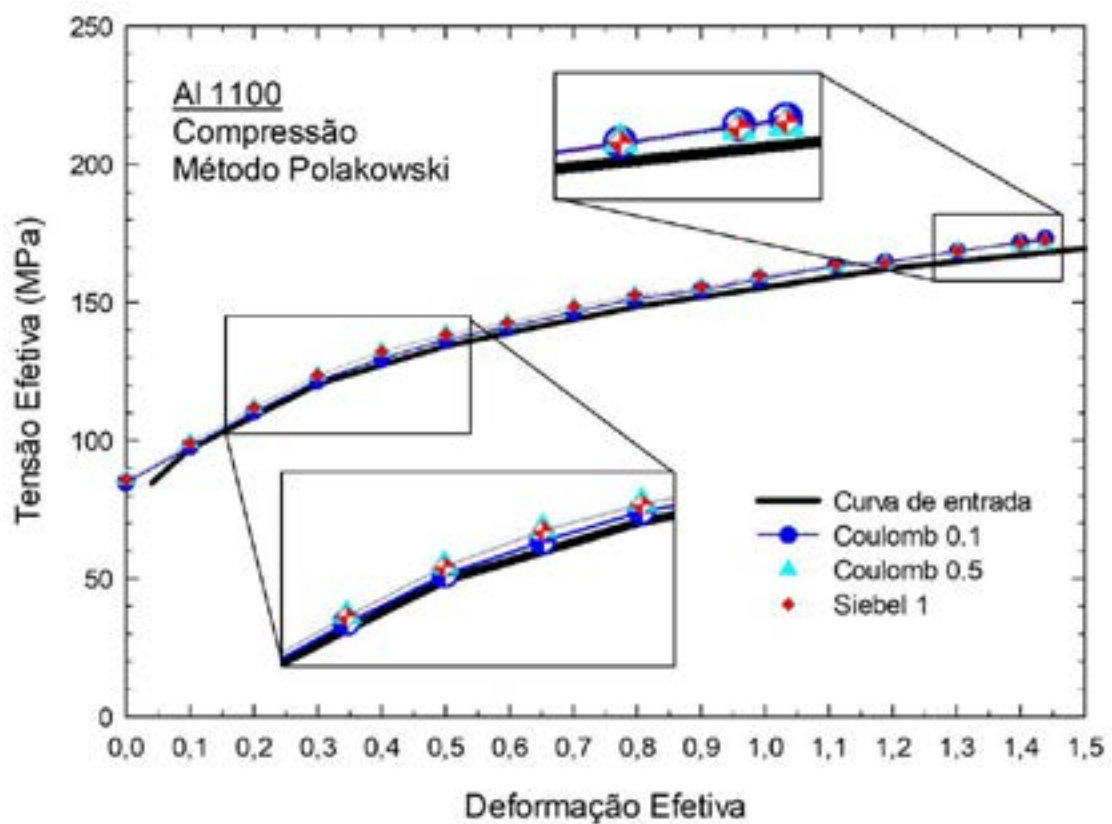


Figura 7: Curvas de fluxo obtidas a partir das simulações usando o método Polakowski com diferentes atritos comparadas com a curva de entrada.

4. CONCLUSÕES

As simulações numéricas realizadas demonstraram que o método Polakowski possibilita obter uma curva de fluxo adequada para um material através do ensaio de compressão, reduzindo significativamente o efeito do atrito entre o corpo de prova e as matrizes nas curvas de fluxo obtidas pelo ensaio de compressão, resultando em diferenças mínimas para variadas condições de atrito.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio continuado, ao longo das últimas décadas, da CAPES, CNPq, FAPEMIG, PPGEM/PROEX - UFMG (Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG) e PPGMEC/PROF-UFMG (Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFMG), às atividades desenvolvidas na área de fabricação por conformação mecânica. Os autores agradecem o apoio da SIXPRO Virtual&Practical Process por possibilitar a utilização do software QForm de simulação de processos de conformação mecânica.

REFERÊNCIAS

- [1] N. H. Polakowski, 'The compression test in relation to cold rolling.', J. Iron Steel Inst, vol. 163, pp. 250–276, 1949.
- [2] S. N. Buckley and K. M. Entwistle, 'THE BAUSCHINGER EFFECT IN SUPER-PURE ALUMINUM SINGLE CRYSTALS AND POLYCRYSTALS*', 1956.
- [3] C. Jong and W. Springer, 'Teaching von Mises Stress: From Principal Axes To Non-Principal Axes', in presented at 2009 Annual Conference & Exposition, 2009.
- [4] P. Bridgman, Studies in Large Plastic Flow and Fracture. New York : McGraw-Hill, 1952.
- [5] S. Khoddam, S. Solhjo, and P. D. Hodgson, 'State of the art methods to post-process mechanical test data to characterize the hot deformation behavior of metals', Advances in Mechanical Engineering, vol. 13, no. 11. SAGE Publications Inc., 2021. doi: 10.1177/16878140211061026.
- [6] J. A. Schey, T. R. Venner, and S. L. Takomana, 'THE EFFECT OF FRICTION ON PRESSURE IN UPSETTING AT LOW DIAMETER-TO-HEIGHT RATIOS', 1982.
- [7] H. Ford, 'Researches into the Deformation of Metals by Cold Rolling', Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, vol. 159, no. 1, pp. 115–143, Jun. 1948, doi: 10.1243/pime_proc_1948_159_014_02.
- [8] A. B. Watts and H. Ford, 'On the Basic Yield Stress Curve for a Metal', 1955.
- [9] F. Šebek, J. Zapletal, P. Kubík, and J. Petruška, 'FLOW BEHAVIOUR IN COMPRESSION TEST UNDER VARIOUS LUBRICATION CONDITIONS', in Engineering Mechanics 2019, May 2019, pp. 351–354. doi: 10.21495/71-0-351.
- [10] W. Reiss and K. Pohlandt, 'THE RASTEGAEV UPSET TEST-A METHOD TO COMPRESS LARGE MATERIAL VOLUMES HOMOGENEOUSLY', Exp Tech, pp. 20–24, 1986.
- [11] P. Christiansen, P. A. F. Martins, and N. Bay, 'Friction Compensation in the Compression Test', in Manufacturing Engineering Education, Elsevier, 2018, pp. 85–104. doi: 10.1016/B978-0-08-101247-5.00004-6.
- [12] C. Tso-Mei and S. U-Yung, 'THE STRESS-STRAIN RELATIONSHIP OF METALS UNDER HOMOGENEOUS COMPRESSION', Institute of Mechanical Engineering, Academia Sinica, vol. x, no. 3, 1961.
- [13] J. Chen et al., 'Methods for measuring friction-independent flow stress curve to large strains using hyperbolic shaped compression specimen', Journal of Strain Analysis for Engineering Design, vol. 57, no. 1, pp. 23–37, Jan. 2022, doi: 10.1177/0309324721995679.



42nd S E N A F O R

26th International Forging Conference

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming Conference / 9th BrDDRG Congress

12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

October 4-6, 2023

Influência da Trefilação na Dureza de Peças Forjadas – uma Análise Integrada do Processo

Bar Drawing Influence on Hardness of Forged Parts – an Integrated Analysis of the Process

Darlan V. Bayão ⁽¹⁾

Túlio C. Nogueira ⁽¹⁾

Geraldo M. M. Ferreira ⁽¹⁾

Ana Luísa C. Barcelos ⁽¹⁾

Ermani V. O. Lima ⁽²⁾

Mariana M. da Silveira ⁽²⁾

Ricardo A. M. Viana ⁽³⁾

Rodrigo R. Lobenwein ⁽³⁾

Alisson S. Duarte ⁽³⁾

Tiago N. Chalinski ⁽⁴⁾

Jones J. Ott ⁽⁴⁾

Guilherme S. Rolim ⁽⁴⁾

Wagner S. Soares ⁽⁴⁾

Rafael C. Gomes ⁽⁴⁾

Jói S. Theis ⁽⁴⁾

Allan G. Waskow ⁽⁴⁾

Roger F. da Silva ⁽⁴⁾

Douglas Martinazzi ⁽⁴⁾

RESUMO

A Dureza final em um produto forjado a frio não tratado termicamente possui influência direta das propriedades mecânicas da matéria prima. Logo, não somente o encruamento durante o processo de forjamento tem papel atuante no aumento da resistência mecânica de um forjado, bem como na variação dessa ao longo do produto, mas também o encruamento empregado durante a etapa de trefilação de barras para a obtenção dos tarugos/geratrizes para o forjamento possui significativa relevância. Este desenvolvimento busca analisar os processos de trefilação e de forjamento a frio na obtenção de um componente automotivo, caracterizando o comportamento mecânico do material antes, durante e após esses processos. Assim, com o auxílio de ensaios mecânicos e da simulação computacional via software QForm UK, foram

⁽¹⁾ Dept. Engenharia; ArcelorMittal Sabará, Brasil, darlan.bayao@arcelormittal.com.br

⁽²⁾ Dept. Engenharia; ArcelorMittal Monlevade, Brasil, ermani.vo.lima@arcelormittal.com.br

⁽³⁾ Eng. de Simulação; SIXPRO Virtual&Practical Process, contato@sixpro.pro

⁽⁴⁾ Dept. Engenharia; Viemar Automotive, Brasil, tnunes@viemar.com.br

estabelecidas metodologias de previsão e definição dos processos de trefilação e de forjamento a frio com foco na dureza final do produto forjado.

Palavras-chave — Forjamento a frio, Trefilação, Encruamento, Dureza, Simulação, Elementos finitos.

Abstract

Final hardness in a cold forged product with no heat treatment is dependent on raw material's mechanical properties. Therefore, both forging strain hardening and initial hardness distribution in the billet due to the bar drawing process are significantly important to the final product quality. This work investigates the bar drawing and forging processes for an automotive part, investigating the mechanical behavior of the material before, during and after those processes. Conducting mechanical tests and FE simulation using QForm UK software, a methodology to predict and setup the bar drawing and cold forging processes, focused on the final hardness distribution, was defined.

Key words — Cold Forging, Bar Drawing, Strain Hardening, Hardness, Simulation, Finite Elements.

1. Introdução

Um componente mecânico precisa atender a especificações necessárias para um bom desempenho em sua aplicação. No caso de peças forjadas a frio e destinadas ao setor automotivo, a resistência mecânica do material é um dos principais requisitos de controle. Assim sendo, a dureza tende a ser a principal propriedade mecânica de referência em regiões específicas da peça final.

Em geral, aços mais macios são desejáveis no forjamento a frio, pois reduzem as cargas solicitadas no equipamento e aumentam a vida útil das matrizes. Entretanto, materiais mais macios e de baixo teor de carbono podem dificultar a obtenção de durezas relativamente maiores, seja por tratamento térmico ou por encruamento. Assim, faz-se necessário uma boa seleção da matéria prima, frente às características do processo de forjamento. Por exemplo, para um forjamento seguido de têmpera pode ser desejável a adição de elementos de liga, ou para um processo sem tratamento térmico pode ser interessante uma maior resistência mecânica no material do tarugo.

De fato, em um processo de forjamento a frio com rígido controle, a qualidade da matéria prima passa a ter influência direta no componente final. No caso de não haver tratamento térmico, essa qualidade se torna ainda mais importante, sendo determinada em função de todas as etapas durante os processos anteriores, como a laminação e a trefilação. Esse é o caso abordado neste artigo, no qual as características de uma barra trefilada são correlacionadas com o posterior processo de forjamento a frio.

Realizou-se ensaios mecânicos no fio máquina, na barra trefilada e no forjado. Além disso, os processos de trefilação e de forjamento foram simulados utilizando-se o software QForm UK (Micas Simulation Ltd., Oxford, UK), considerando os dados dos ensaios para determinar o comportamento do material e para fazer comparações entre resultados práticos e simulados. Sobretudo, o processo de trefilação foi investigado para compreender a influência dos seus principais parâmetros no perfil de dureza do tarugo e, finalmente, foram propostas metodologias de previsão da dureza final no forjado.

2. Trefilação de barras

Barras trefiladas em aço SAE 10B30, também denominado PL30D na trefilaria, com a sua composição química típica mostrada na Tabela 1, são cortadas em comprimentos específicos para serem utilizadas como tarugos em processos de forjamento a frio de componentes automotivos. Logo, considerou-se o processo de trefilação desse material, o qual parte de um fio máquina laminado a quente de 20,64 mm de diâmetro e é conformado em apenas um passe para uma barra trefilada de 19,05 mm de diâmetro.

Tabela 1 – Composição química (%p) do aço SAE 10B30.

Componente	S	C	Mn	P	Si	Al	Cr	B	N	Ti	Fe
Mín.	0,000	0,300	0,800	0,000	0,150	0,020	0,300	0,001	0,000	0,020	Bal.
Máx.	0,007	0,340	1,000	0,020	0,300	0,080	0,400	0,003	0,006	0,040	Bal.

Utilizando-se uma fierra com semi-ângulo α de 15° , a simulação do processo de trefilação está apresentada na Figura 1. A imagem inclui fotografias de alguns dos corpos de prova ensaiados por compressão, indicando a região de retirada dessas amostras, antes e após a trefilação. A partir dos ensaios de compressão foram obtidas as curvas de escoamento do fio máquina e da barra trefilada, σ_{FM} e σ_{BT} (MPa) respectivamente, em função da deformação plástica, ε , definidas pelas Eqs. 1 e 2. A simulação se baseou na curva de escoamento do fio máquina, desconsiderando efeitos da velocidade de deformação e da temperatura, e utilizou uma condição de atrito híbrida, com um coeficiente de atrito de 0,05 e um fator de atrito de 0,1.

$$\sigma_{FM} = 401 + 550 \cdot \varepsilon^{0,22} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\sigma_{BT} = 512 + 470 \cdot \varepsilon^{0,26} \quad (\text{Eq. 2})$$

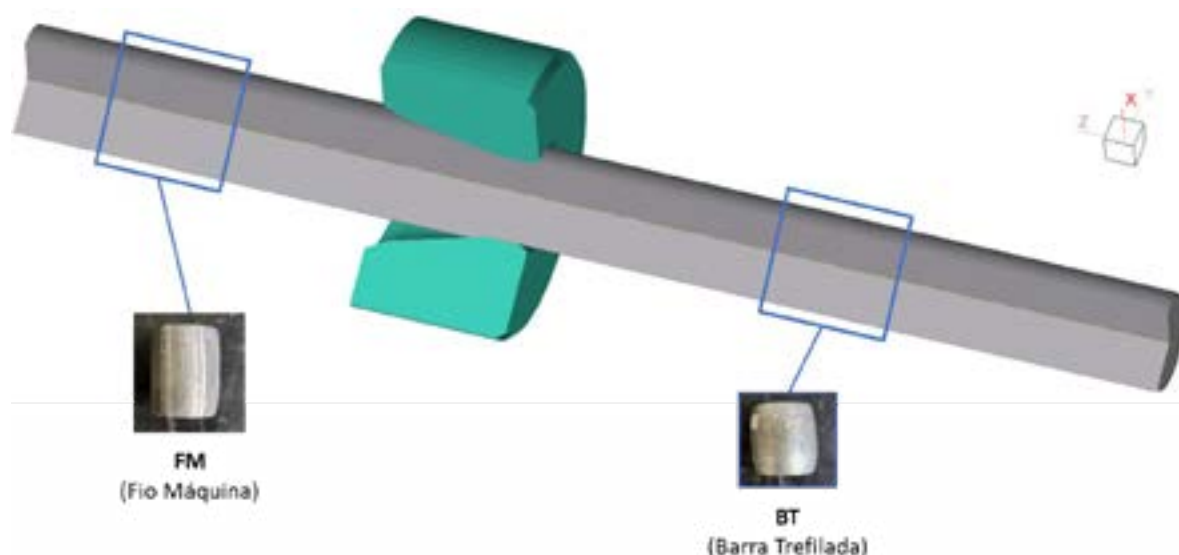


Figura 1 – Simulação da trefilação de uma barra, indicando a região de retirada de amostras para ensaios de compressão experimentais.

Sendo a trefilação um processo de conformação a frio, o fio máquina sofre encruamento. No entanto, o perfil de encruamento não é uniforme na barra trefilada, como constatado a partir do perfil de deformação plástica mostrado na Figura 2. A deformação plástica variou de 0,19 a 0,37 ao longo do diâmetro da barra trefilada, como pode ser visto pontualmente ao longo do raio na Figura 3.



Figura 2 – Previsão da deformação plástica na barra trefilada (seção longitudinal).

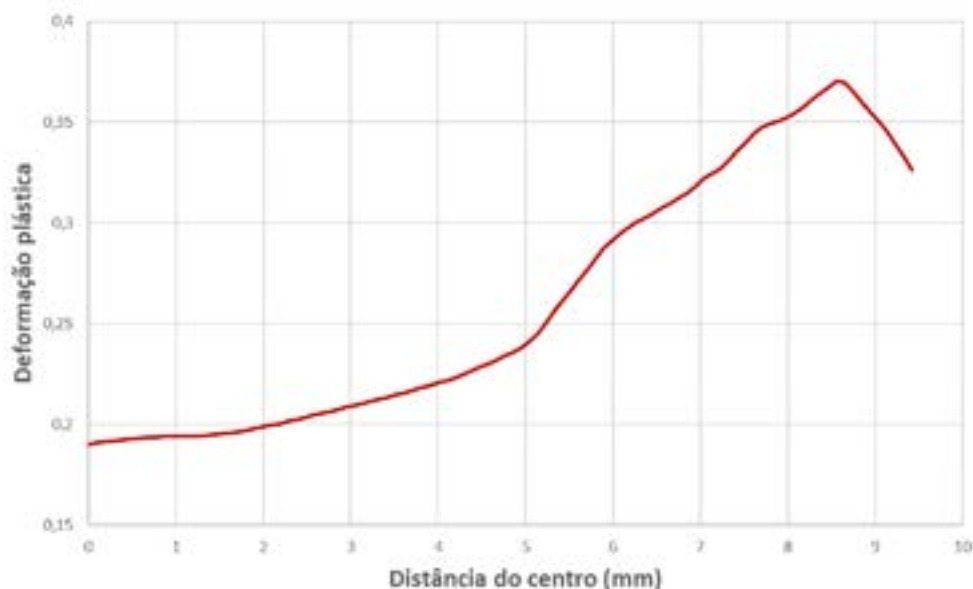


Figura 3 – Previsão da variação da deformação plástica ao longo do raio da barra trefilada.

A despeito da deformação plástica mínima encontrada na barra, a deformação plástica uniforme, ε_u , necessária para se obter a redução em questão seria 0,16 (Eq. 3). Entretanto, observa-se que a deformação empregada na trefilação foi maior, a qual pode ser definida como uma deformação redundante e pode ser observada com base na distorção da matriz de linhas após a passagem pela fieira (Figura 4). A deformação redundante ocorre em razão da geometria da fieira, a qual distorce o material e por isso aumenta a deformação, sendo ainda assim necessária para a realização de um processo economicamente viável. A maneira como essa deformação redundante se dá tem relação direta com o perfil de deformação plástica na barra.

$$\varepsilon_u = \ln \left(\frac{A_0}{A_f} \right) \quad (\text{Eq. 3})$$

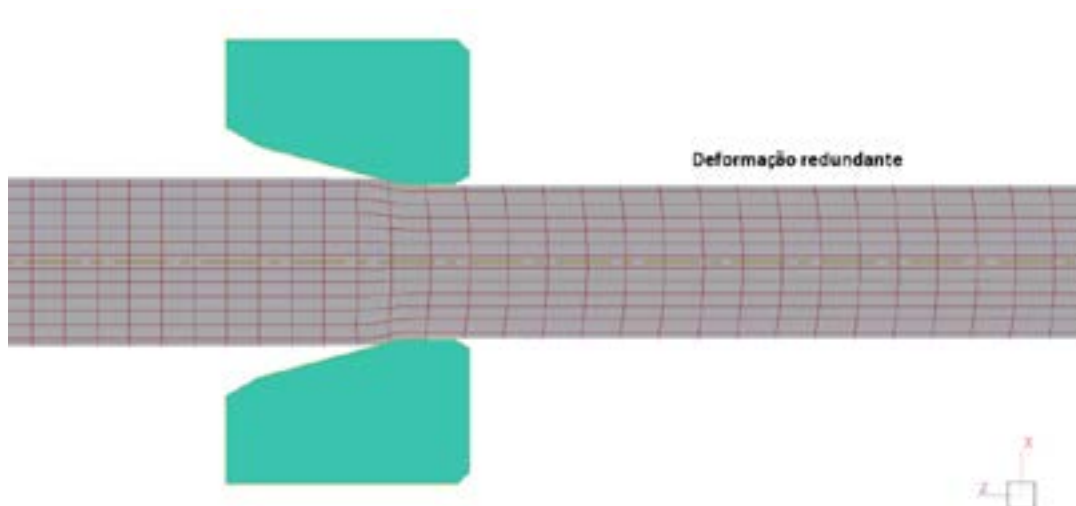


Figura 4 – Deformação redundante evidenciada pela distorção da matriz de linhas.

A curva de escoamento do fio máquina (Eq. 1) está plotada na Figura 5, sob a qual é possível quantificar o trabalho necessário para se realizar a deformação média de trefilação, $\bar{\varepsilon}_{Tref}$. Neste gráfico foram indicadas e distinguidas as áreas para o cálculo do trabalho uniforme e do trabalho redundante, sendo que o trabalho redundante foi limitado à deformação plástica média final de 0,26 (Eq. 4).

$$\bar{\varepsilon}_{Tref} = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i}{n} \quad (\text{Eq. 4})$$

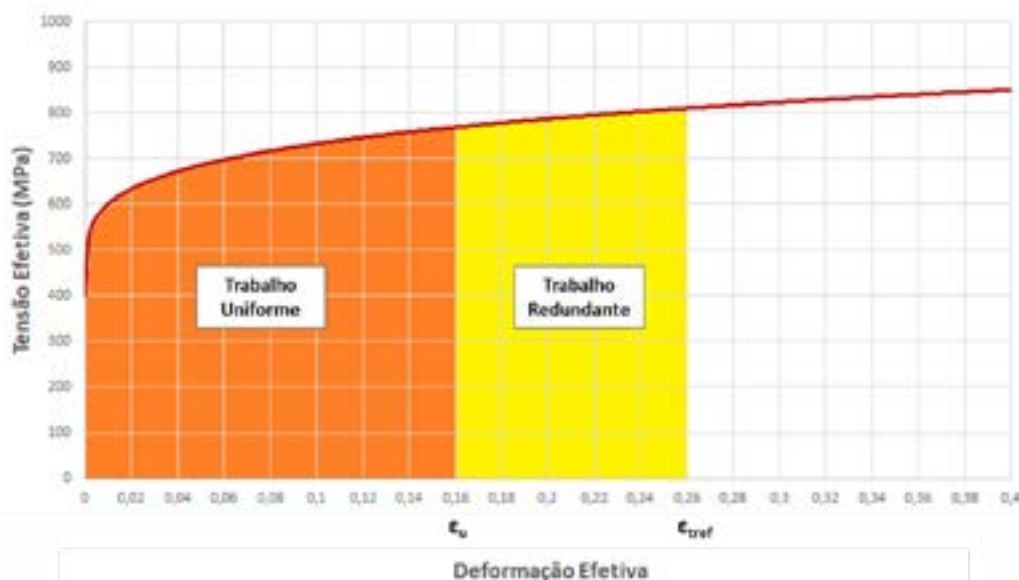


Figura 5 – Trabalho por unidade de volume realizado no processo de trefilação.

Considerando a deformação plástica média obtida na barra trefilada, plotou-se no gráfico da Figura 6 a curva de escoamento do fio máquina (Eq. 1) e a curva de escoamento da barra trefilada (Eq. 2) deslocada para iniciar com 0,26 de deformação. Observou-se na prática que a tensão de escoamento inicial da barra trefilada não foi equivalente à tensão de escoamento no fio máquina naquela deformação. Para comparação, foi simulado um ensaio de compressão na barra trefilada, mantendo a mesma curva de escoamento do fio máquina para o material, e esse ensaio simulado resultou em uma curva de escoamento na qual a tensão de escoamento inicial foi equivalente à tensão no fio máquina.

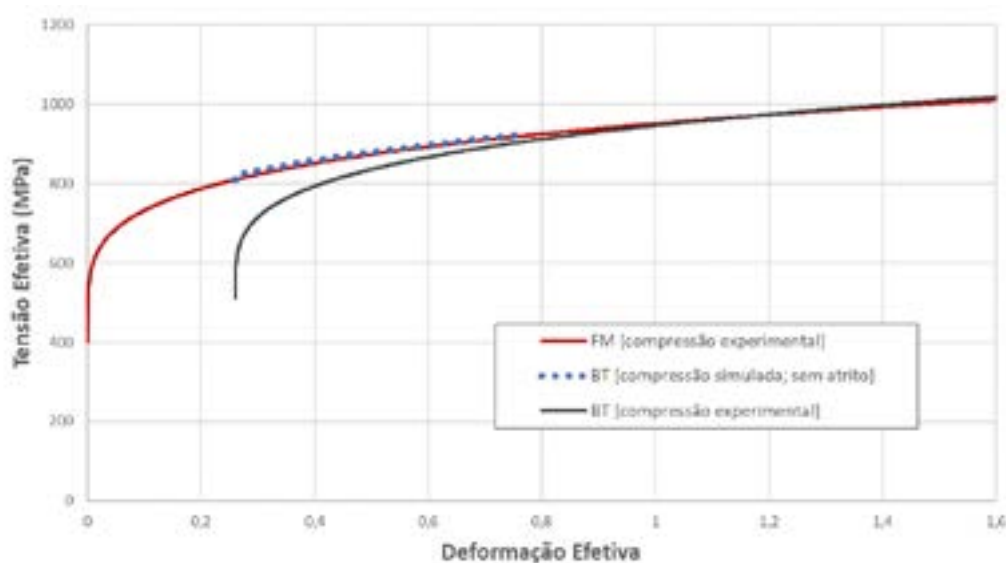


Figura 6 – Curvas de escoamento para o fio máquina (FM) e para a barra trefilada (BT).

Portanto, sugere-se que a simulação do forjamento não seja realizada mantendo como base a curva de escoamento do fio máquina, mas sim com base na curva de escoamento experimental obtida diretamente da barra trefilada. Isso é particularmente importante em casos nos quais a peça forjada tenha regiões de interesse com a obtenção de relativas baixas quantidades de deformação. No entanto, caso o forjamento imprima na peça maiores deformações, a curva de escoamento do fio máquina poderia ser utilizada, desde que se considere a influência da trefilação, uma vez que ambas as curvas de escoamento tendem a convergir.

Além das curvas de escoamento, obteve-se também o comportamento da dureza ao longo do raio para o fio máquina e para a barra trefilada (Figura 7). O Fio Máquina apresentou uma variação advinda, possivelmente, da taxa de resfriamento após a laminação a quente, uma vez que as regiões superficiais resfriaram mais rápido e, assim, atingem durezas relativamente mais altas. Já a barra trefilada apresentou

durezas significativamente mais altas, em razão do encruamento, e manteve uma tendência de maior dureza nas regiões mais próximas à superfície, embora a variação da dureza tenha sido reduzida em relação ao fio máquina. A dureza média (Eq. 5) foi calculada para os dois casos, resultando em 204 HV para o fio máquina e em 243 HV para a barra treilada.

$$\bar{H} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i}{n} \quad (\text{Eq. 5})$$

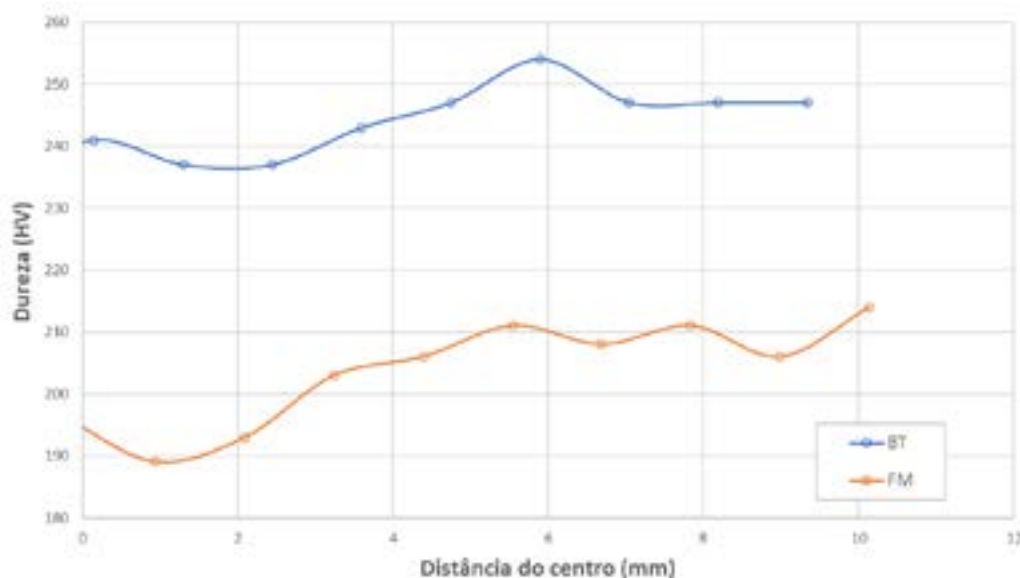


Figura 7– Variação da dureza medida ao longo do raio para o fio máquina (FM) e para a barra treilada (BT).

3. Forjamento a Frio

O forjamento a frio de um componente automotivo foi realizado a partir da barra treilada em aço SAE 10B30 com 19,05 mm de diâmetro caracterizada no item anterior. Após o forjamento, a peça foi cortada em uma determinada região e realizou-se medidas de dureza em diversos pontos da seção cortada, incluindo os pontos numerados na Figura 8.

Ponto	Dureza (HV)
4	270
5	274
6	275
7	283
8	278
9	260
10	252
11	271
12	244
13	249
14	239
15	249



Figura 8 – Durezas medidas na seção longitudinal do forjado.

Simulações do processo de forjamento da peça apresentada na Figura 8 foram feitas com base na curva de escoamento da barra trefilada (Eq. 2) e variando-se a condição do tarugo: (i) sem deformações prévias e (ii) incluindo o histórico do processo da trefilação (Figura 9). Logo, houve diferenças na previsão da deformação plástica final, como pode ser visto na Figura 10. Foi possível observar que a simulação considerando a operação de trefilação apresentou maiores deformações plásticas. Além disso, observou-se também um escoamento ligeiramente diferente e a presença de gradientes de deformação plástica provenientes da trefilação em regiões que sofreram pouca ou nenhuma deformação durante o forjamento.

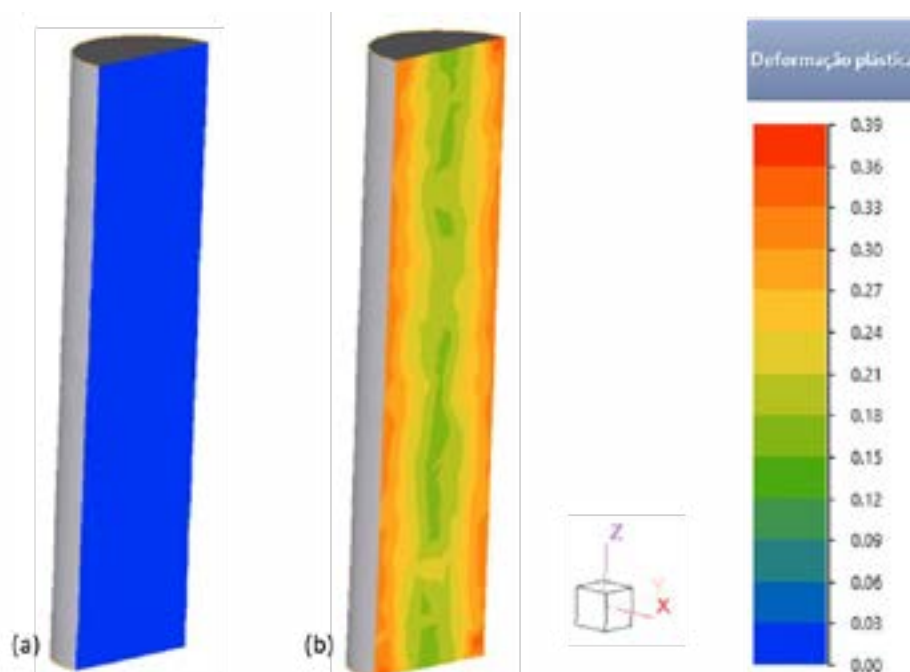


Figura 9 – Tarugos para a simulação do forjamento: (a) não encruado e (b) encruado por trefilação.

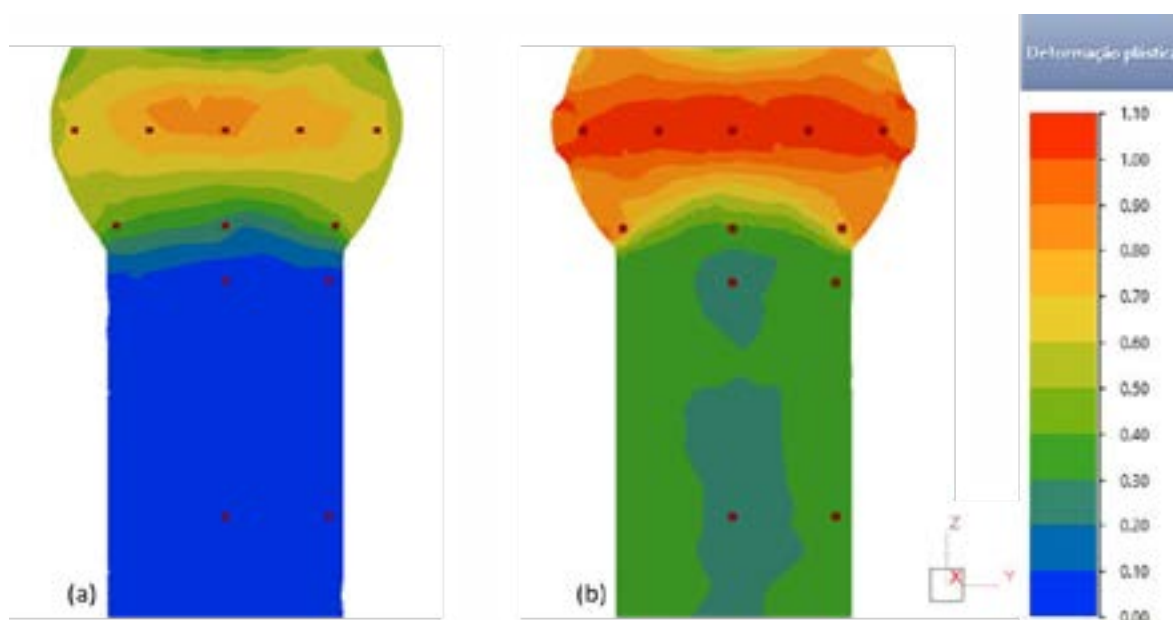


Figura 10 – Previsão da distribuição da deformação plástica no forjado a partir dos tarugos (a) não encruado e (b) encruado por trefilação.

Inicialmente, o objetivo seria prever o comportamento da dureza durante o forjamento a partir da evolução da tensão de escoamento. No entanto, a condição observada na Figura 6, na qual a tensão de escoamento da barra trefilada não acompanha a tensão de escoamento do fio máquina, sugeriu uma alteração na metodologia, buscando então determinar o comportamento da dureza em função da

deformação plástica. Para isso, correlacionou-se as deformações plásticas previstas nas simulações (Figura 10) com as medidas de dureza na peça (Figura 8), resultando nas Eqs. 6 e 7, definidas a partir das tendências mostradas na Figura 11. As tendências de dureza foram definidas desconsiderando-se o encruamento prévio do tarugo, H_0 (HV), e também considerando-se o encruamento prévio, H_t (HV). Vale dizer que estas tendências são específicas para o caso em análise, podendo a metodologia ser generalizada para outros casos.

$$H_0 = -136,2 \cdot \varepsilon^3 + 137,6 \cdot \varepsilon^2 + 18,2 \cdot \varepsilon + 243,7 \quad (\text{Eq. 6})$$

$$H_t = 185,1 \cdot \varepsilon^3 - 405,1 \cdot \varepsilon^2 + 305,6 \cdot \varepsilon + 183,1 \quad (\text{Eq. 7})$$

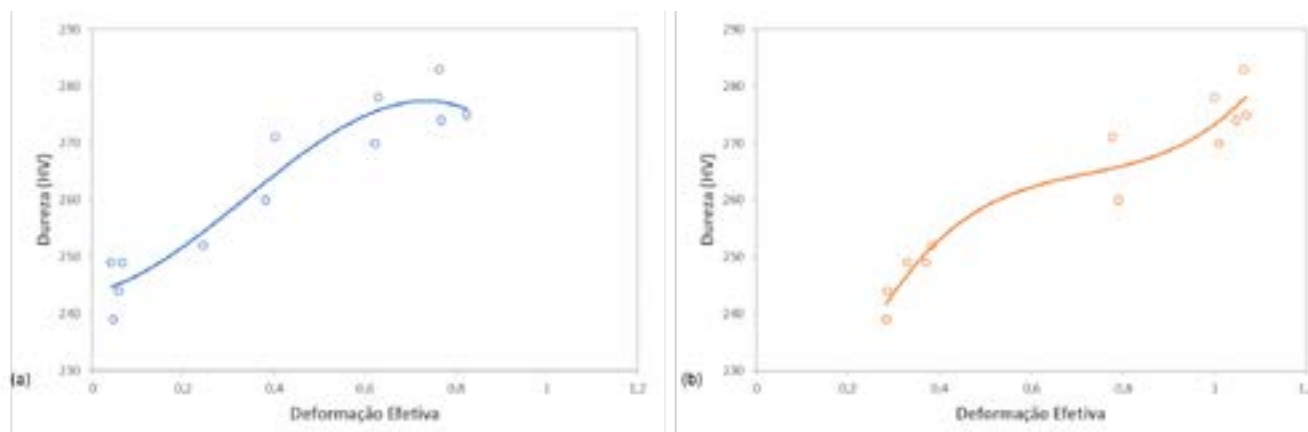


Figura 11 – Deformação plástica final simulada em função da dureza medida, considerando tarugos (a) não encruado e (b) encruado por trefilação.

As tendências de dureza encontradas nas Eq. 6 e 7 foram implementadas nas simulações, propiciando a previsão da dureza na peça toda, como pode ser visto na Figura 12. A partir das imagens, verifica-se que os valores de dureza obtidos no caso que considera o encruamento prévio do tarugo possuem uma tendência mais realista, ao menos em regiões de deformações muito baixas ou muito altas. Inclusive, a comparação gráfica mostrada na Figura 13 auxilia na compreensão da precisão dessas tendências definidas. Embora essas tendências apresentem divergências da realidade em determinados pontos, ambas podem ser utilizadas para a previsão da dureza, especialmente caso sejam trabalhadas e ajustadas para um aumento na precisão da previsão da dureza.

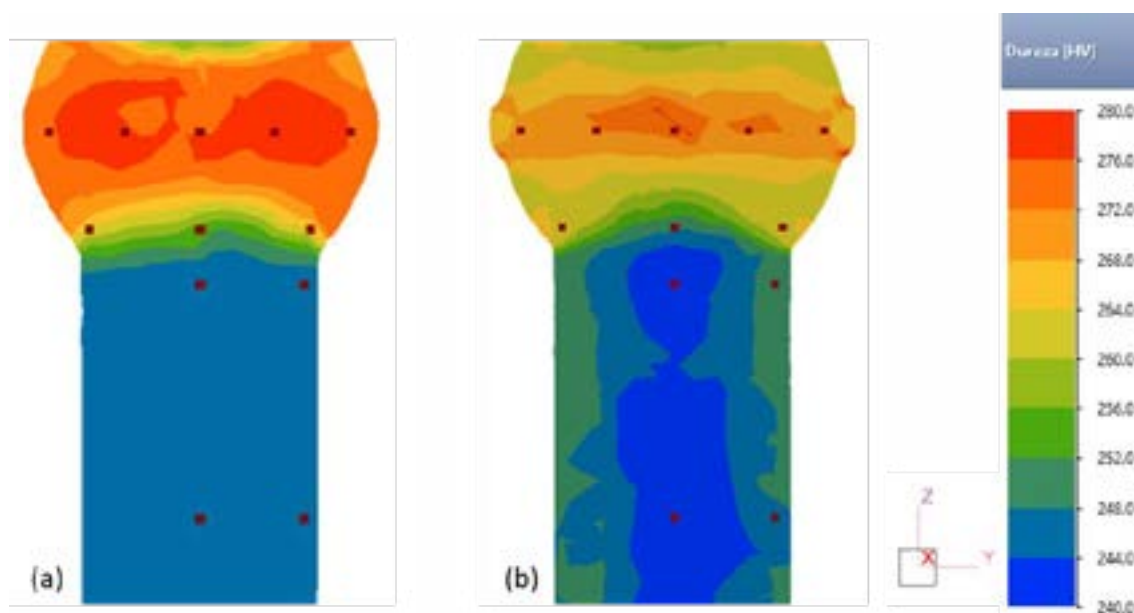


Figura 12 – Previsão da distribuição da dureza no forjado a partir dos tarugos (a) não encruado e (b) encruado por trefilação.

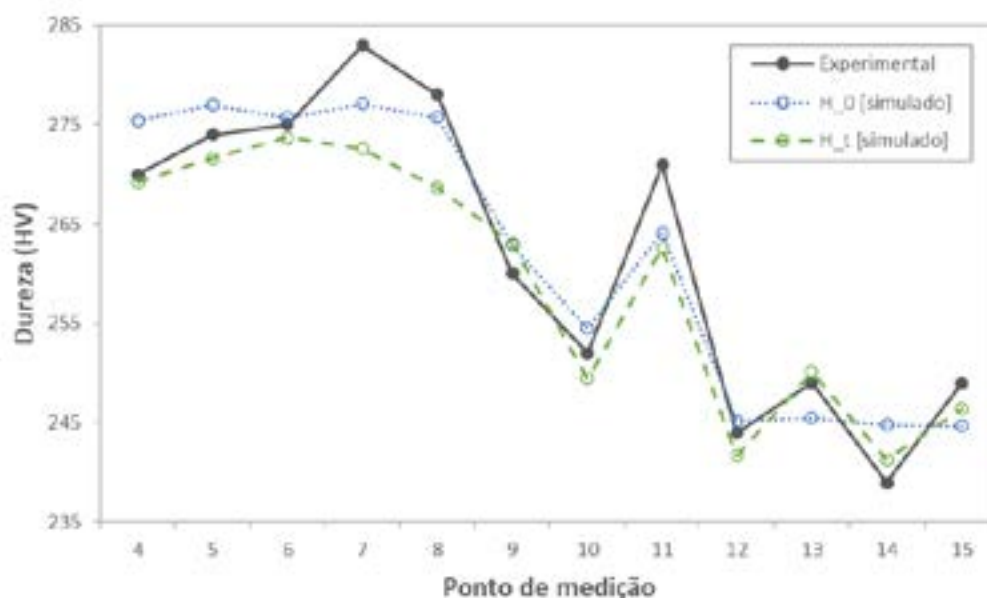


Figura 13 – Previsão da distribuição da dureza no forjado em comparação com os valores experimentais.

4. Alterações no trefilado

Buscando exemplificar a influência das condições de trefilação na resistência mecânica da barra, analisou-se a variação dos parâmetros: semi-ângulo da fieira e diâmetro do fio máquina. Entretanto, vários outros aspectos podem influenciar na qualidade da barra trefilada, como a condição de lubrificação, a velocidade de trefilação, o comprimento do paralelo, a evolução no desgaste da fieira, entre outros.

Variando o semi-ângulo da fieira entre 3 e 15°, observou-se que menores semi-ângulos proporcionam um perfil de deformação plástica mais homogêneo, como relatado na Figura 14. Logo, a dureza média na seção da barra tende a diminuir com a diminuição do semi-ângulo. Buscando determinar essa tendência, estimou-se a Eq. 8 com base nos perfis de deformação simulada e de dureza medida, obtendo-se reduções na dureza média de até 8 HV no caso do semi-ângulo de 3°.

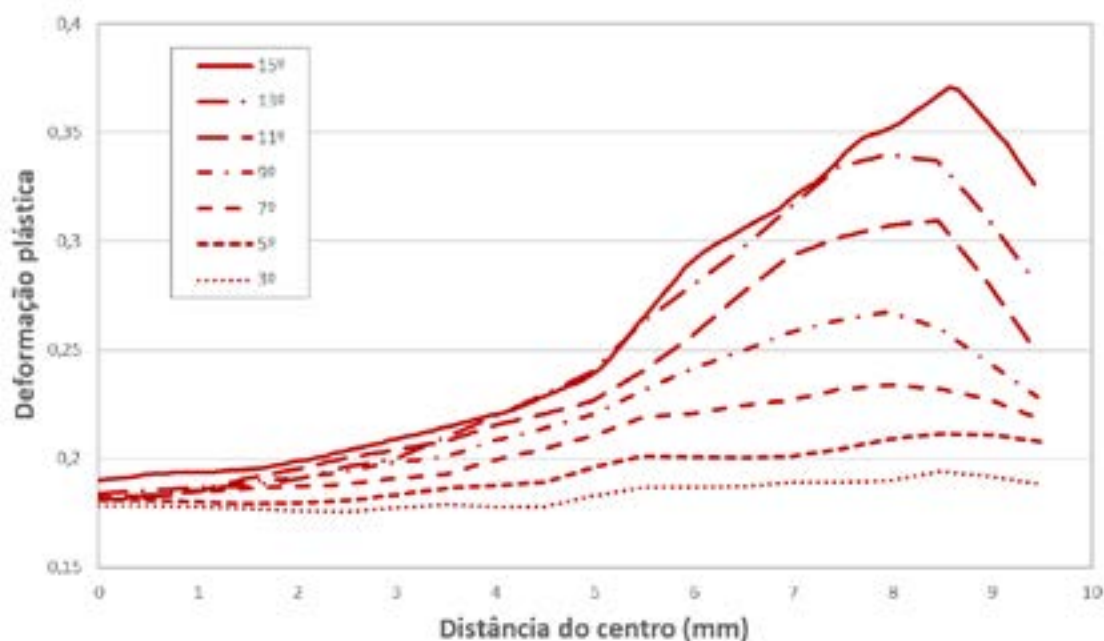


Figura 14 – Previsão da deformação plástica na barra trefilada para diferentes semi-ângulos da fieira.

Além do perfil de deformação plástica, observou-se também a influência do semi-ângulo na força de trefilação, apresentada na Figura 15. A força de trefilação resultante pode ser demonstrada como uma composição da força necessária para se deformar a barra uniformemente, calculada com base no trabalho uniforme (Figura 5), da força necessária para realizar a deformação redundante, obtida a partir de simulações com atrito nulo, e da força necessária para vencer o atrito, obtida da diferença resultante. Assim, encontrou-se uma faixa entre 5 e 9° para a qual a força de trefilação é reduzida e, portanto, passível de economia de energia.

$$\bar{H}_{tref} = 105,7 \cdot \bar{\epsilon}_{tref} + 216,9 \quad (\text{Eq. 8})$$

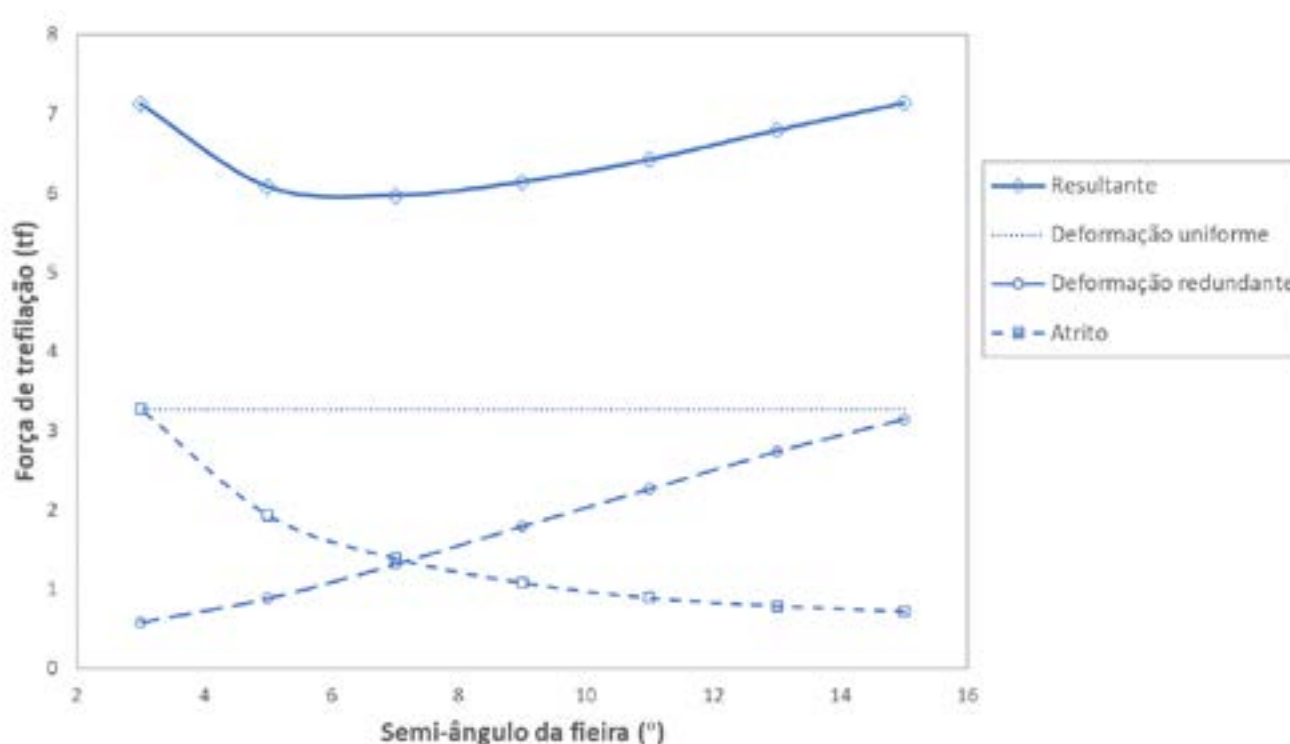


Figura 15 – Força de trefilação resultante e suas componentes em função do semi-ângulo da fieira.

O diâmetro do fio máquina é outro parâmetro possível de ser ajustado e que influencia de maneira significativa na dureza da barra trefilada. Determinando um semi-ângulo da fieira de 7° e variando o diâmetro do fio máquina entre 20,00 e 20,64 mm, apresenta-se o resultado no comportamento da deformação plástica na barra trefilada na Figura 16. Para comparação, considerando o processo atual com 15° de semi-ângulo e 20,64 mm de diâmetro do fio máquina, a estimativa de diminuição da dureza média na barra trefilada para um processo com 7° de semi-ângulo e 20,00 mm de diâmetro do fio máquina seria de 12 HV.

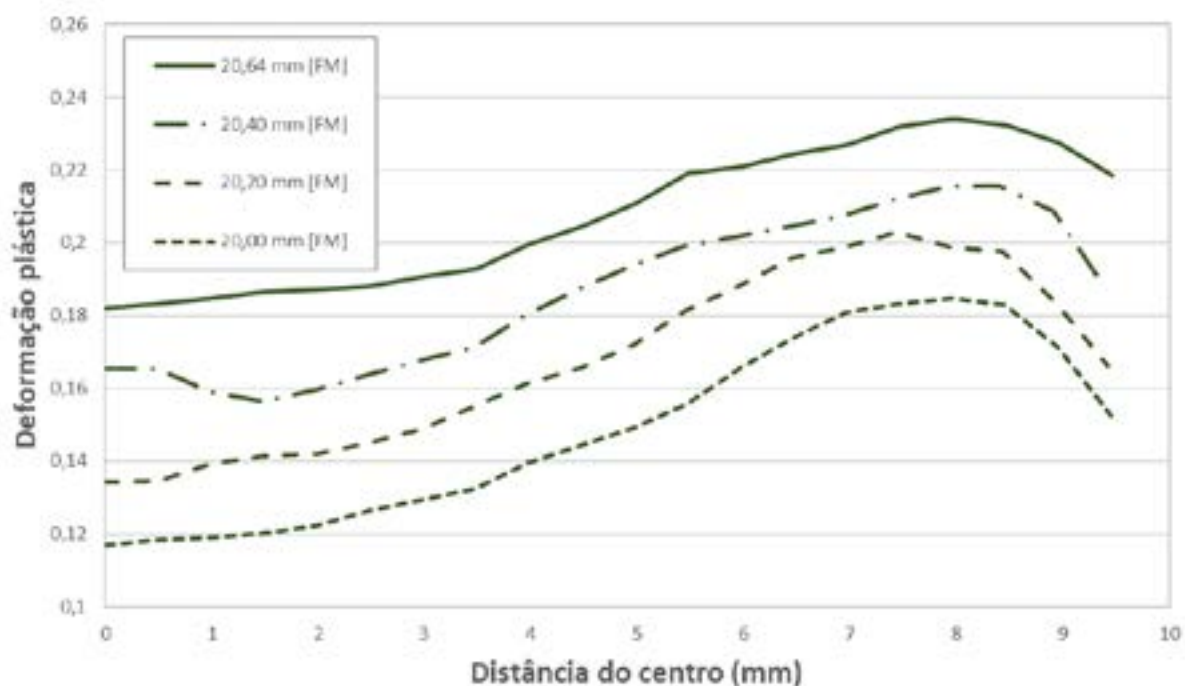


Figura 16 – Previsão da deformação plástica na barra trefilada para um semi-ângulo de 7° da fieira e diferentes diâmetros do fio máquina (FM).

Para demonstração da influência na condição de encruamento do produto final forjado, utilizou-se uma barra trefilada com 7° de semi-ângulo da fieira, partindo de um fio máquina de 20,20 mm de diâmetro, como matéria prima para a simulação do forjamento. A distribuição de dureza ao longo da seção está mostrada na Figura 17. Além disso, esta distribuição também está mostrada na Figura 18 em comparação com o produto forjado a partir de uma barra trefilada com 7° de semi-ângulo da fieira e fio máquina com 20,64 mm de diâmetro. Interessante observar que, embora regiões de baixa deformação plástica apresentem maiores diferenças nos valores de dureza, regiões com maiores quantidades de encruamento tendem a convergir seus resultados de dureza. Isso pode ter especial importância, uma vez que barras menos resistentes mecanicamente poderão gerar menor desgaste nas matrizes de forjamento, contudo mantendo uma boa capacidade de obtenção de altas durezas por encruamento.

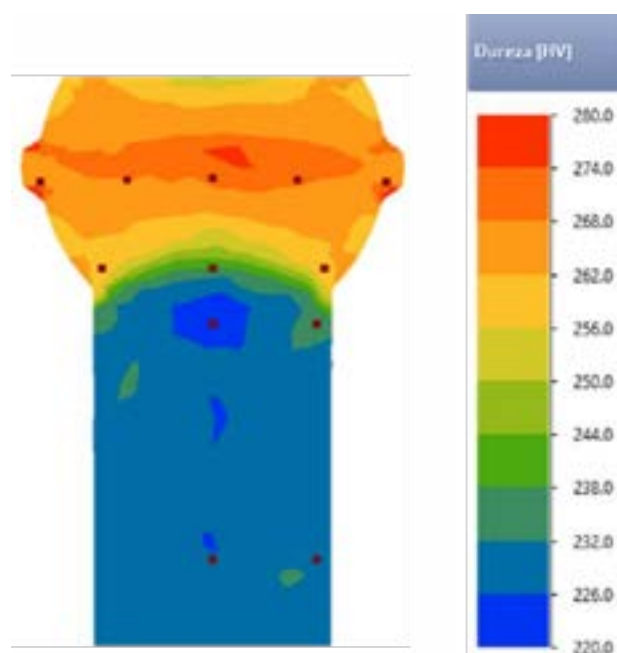


Figura 17 – Previsão da distribuição da dureza no forjado a partir de um tarugo trefilado com 7° de semi-ângulo da fieira, proveniente de um fio máquina de 20,20 mm de diâmetro.



Figura 18 – Previsão da distribuição da dureza no forjado a partir de dois tarugos com resistências mecânicas distintas.

5. Conclusões

Investigou-se diversos parâmetros de trefilação em atenção aos seus efeitos na resistência mecânica de um produto final forjado a frio sem etapas de tratamento térmico. Logo, concluiu-se que os processos de laminação a quente, determinando a bitola do fio máquina, e de trefilação possuem influência significativa no forjamento.

A previsão do forjamento por simulação, incluindo a etapa de trefilação, é apontada como uma prática muito interessante para a previsão de propriedades mecânicas finais no forjado. Entretanto, um modelo que não contemple a etapa de trefilação se mantém apropriado, especialmente caso as equações utilizadas na previsão dessas propriedades sejam ajustadas.

Barras trefiladas com menores durezas são desejáveis para o forjamento, uma vez que minimizam desgastes e eventuais quebras nas matrizes de forjamento a frio. Ainda assim, essas barras com menor dureza mantêm uma boa capacidade de encruamento, favorecendo a obtenção de durezas pré-definidas para as peças finais durante o forjamento.

Neste caso, a partir de uma interação eficiente entre fornecedor (trefilaria) e cliente (forjaria), tornou-se possível investigar o processo de maneira integrada, proporcionando a elaboração de planos de ação que visem alterar o processo de trefilação e, assim, otimizar os resultados obtidos na forjaria.



42nd SENAFOR
26th International Forging Conference
25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming
Conference / 9th BrDDRGR Congress
12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS
October 4-6, 2023

Eliminação de Vazios em Tarugos de Aço por Forjamento por Recalque

Void Elimination in Steel Billets through Upsetting

Pedro L. F. Perdigão ⁽¹⁾
Renato C. dos Santos ⁽²⁾
Taíse Azevedo ⁽³⁾
Alisson S. Duarte ⁽⁴⁾
Pedro Henrique R. Pereira ⁽⁵⁾

RESUMO

Uma das características de qualidade definidas como críticas em projetos mecânicos é a sanidade interna das peças, resultado direto do caldeamento de porosidades internas proveniente do processo de solidificação dos lingotes (matéria prima para forjados de grande porte). O fechamento desses vazios está diretamente relacionado à rota de conformação estabelecida durante o processo de forjamento, sendo que entre as operações realizadas, o recalque é de fundamental importância para o decorrer do processo. Este trabalho visou estudar o comportamento de defeitos internos em tarugos submetidos a operações de recalque através de simulação numérica e física de corpos de provas com furo passante central. Os resultados revelaram a ocorrência da abertura dos vazios longitudinais para reduções de altura inferiores a aproximadamente 35%. O aumento da redução de altura leva a uma inversão nessa tendência que culmina no completo fechamento dos vazios na região central dos tarugos para a redução de 65%.

Palavras-chave — Forjamento a Quente, Recalque, Matriz Aberta, Vazios, Defeito Interno, Simulação, Elementos finitos.

Abstract

One of the critical quality requirements corresponds to the internal soundness of the parts which can be assured through the closing of internal porosities arising from the solidification process of ingots. The closure of these voids is directly related to the processing route established during the forging process. This study aimed to investigate the behavior of internal defects in billets subjected to reduction processes through numerical and physical simulations of the process of upsetting at different height reduction ratios for billets with a longitudinal hole. The results revealed the occurrence of opening of longitudinal voids

⁽¹⁾ Mestrando, DEMET, UFMG, pedro.lfp@gmail.com

⁽²⁾ Analista de Processos Especialista, Açoforja, Brasil, rcsantos@acoforja.com.br

⁽³⁾ Coordenadora de Engenharia, Açoforja, Brasil, tsousa@acoforja.com.br

⁽⁴⁾ Professor Adjunto, DEMC, UFMG, alisson@sixpro.pro

⁽⁵⁾ Professor Adjunto, DEMET, UFMG, ppereira@demet.ufmg.br

for reductions in height below 35%, approximately. The increase in reduction height leads to a reversal in this trend, resulting in the complete closure of voids in the central region of the billets for a height reduction of 65%, approximately.

Key-words — Hot Forging, Upsetting, Open die, Void closure, Finite Element Modeling.

1. Introdução

A demanda por eixos e outras peças forjadas pelas indústrias com um elevado padrão de qualidade está aumentando, sendo os usuários típicos dessas peças empresas fabricantes de equipamentos de energia (geradores hidroelétricos, eólicos, nucleares etc.), equipamentos para mineração, óleo e gás entre outros. Estes componentes podem ser produzidos em aço 42CrMo de maneira a seguir requisitos de sanidade interna, a qual é fundamental para atendimento aos elevados padrões de qualidade exigidos pelo mercado. Normalmente, estes critérios são avaliados por meio de ensaio não destrutivo de ultrassom.

A existência de descontinuidades internas típicas do produto fundido, como exemplificado na Figura 1, não é tratada como um desvio de qualidade por parte de seus fabricantes, cabendo às forjarias o desenvolvimento de rotas de conformação capazes de caldear esses vazios e promoverem uma estrutura homogênea dentro dos critérios de aceitação de qualidade. Dessa forma, é importante o entendimento adequado do comportamento do aço 42CrMo através da análise dos caminhos de deformação e a sua evolução microestrutural durante o processo de conformação, para que se possa desenvolver estratégias que propiciem uma microestrutura refinada e homogênea ao final do forjamento, levando em consideração também aspectos dimensionais e cargas necessárias para conformação.

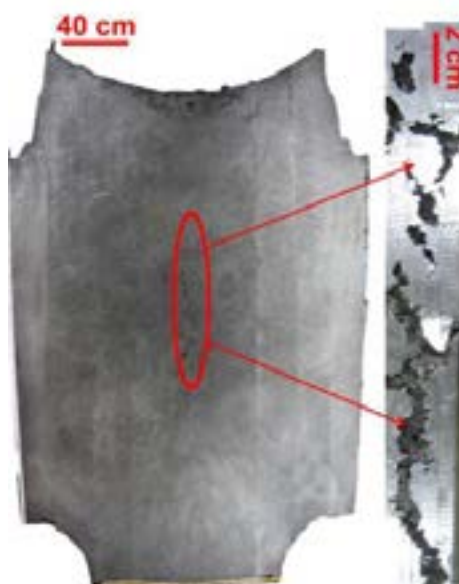


Figura 1 – Fotos de um lingote seccionado com detalhe da porosidade de contração na região central ampliada (Wang *et al.*, 2011) (ADAPTADO).

Em específico, o recalque (Figura 2) é um processo muito utilizado para se obter grandes forjados a partir de lingotes, objetivando primariamente o aumento do grau de forjamento através de uma série de compressões e estiramentos (Lee *et al.*, 2008). Além disso, o recalque é utilizado para aumentar o diâmetro da peça ou para se produzir discos forjados. Um dos parâmetros de controle mais importantes para a operação de recalque é a relação entre a altura (H) e o diâmetro (D) do lingote (H/D), de fundamental influência na distribuição de deformação, flambagem durante o processo, na carga

aplicada e na forma e dimensão final do forjado, sendo que essa relação possui valor ótimo em torno de 3 (três) (Erman et al., 1989).



Figura 2 – Operação de Recalque em prensa hidráulica de 2,5 toneladas-força.

Segundo Villabón Ramos et al. (2003), o processo de recalque está diretamente relacionado ao comportamento dos defeitos internos, proveniente do lingotamento, após a conformação mecânica, sendo que para determinado valor de deformação (redução de altura após forjamento) existe uma tendência de abertura que se inverte para percentuais de redução mais altos. Os defeitos têm sua área aumentada até uma determinada deformação a partir da qual eles passam a diminuir até serem completamente fechados na região central do corpo de prova, como ilustrado na Figura 3.

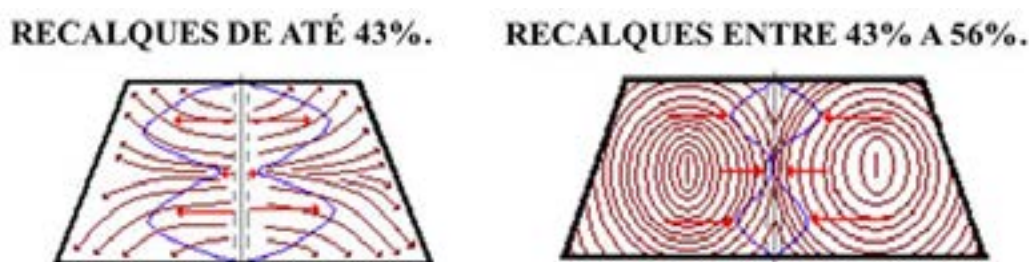


Figura 3 – Fluxo de material para diferentes percentuais de recalques (Villabón Ramos et al., 2003) (ADAPTADO).

Visando avaliar o comportamento dos defeitos internos em lingotes processados por forjamento em matriz aberta por meio da operação de recalque, o presente trabalho propôs a realização de uma série de simulações físicas, em combinação ao desenvolvimento de um modelo matemático em software de simulação por elementos finitos. O software utilizado em tais simulações foi o QForm UK (Micas Simulation Ltd., Oxford, UK).

2. Simulação física

O material utilizado nas simulações físicas e numéricas foi o aço baixa liga (cromo-molibdênio) 42CrMo, proveniente de aciaria elétrica com refino secundário em forno panela, desgaseificado a vácuo e lingotado convencionalmente. A faixa de composição química desse aço é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química do aço 42CrMo (% em massa).

	%C	%Mn	%Si	%Cr	%Mo	%Ni
Min.	0,38	0,60	0,18	0,70	0,20	1,65
Máx.	0,43	0,80	0,32	0,90	0,30	2,00

Para a realização dos experimentos, foram confeccionados 10 (dez) corpos de provas cônicos, sendo o diâmetro menor de aproximadamente 43 mm e o maior de aproximadamente 53 mm, com furo passante de aproximadamente 2 mm, correspondendo a aproximadamente 4% do diâmetro externo da região média do corpo-de-prova, conforme Figura 4. Os furos nas extremidades do corpo de prova foram tamponados utilizando solda para evitar a formação de óxidos no processo de aquecimento, anterior ao recalque (Villabón Ramos et al., 2003).

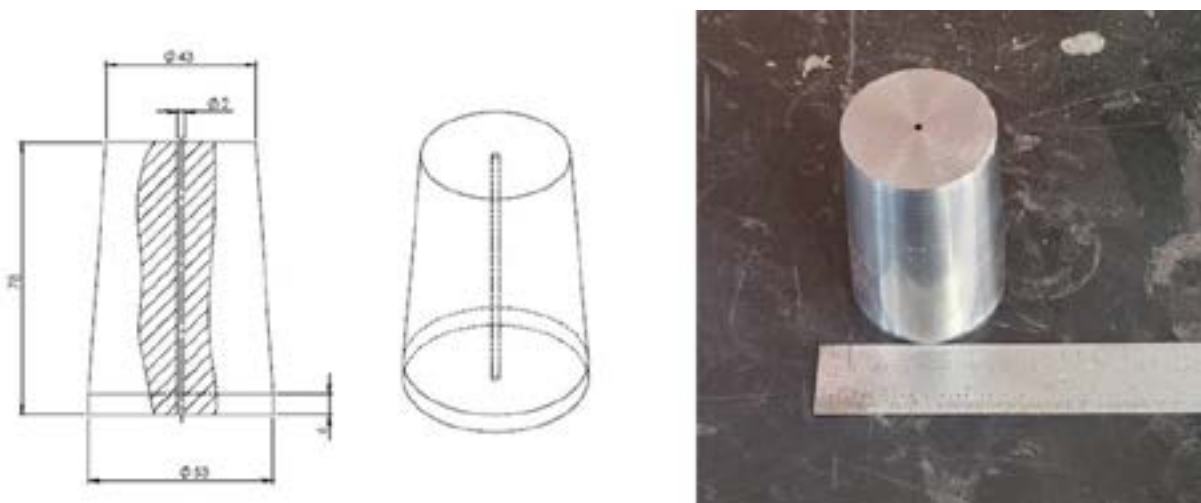


Figura 4 – Corpo de prova utilizado na simulação física de recalque.

O procedimento experimental das simulações físicas envolveu o aquecimento do material até a temperatura de 1100 °C em um forno elétrico do tipo mufla. Após a retirada do forno, os corpos de prova foram posicionados sobre um conjunto de matrizes paralelas previamente pré-aquecidos à aproximadamente 300°C. O tempo médio de transferência entre o forno e o início da deformação foi de 50 segundos. A operação de recalque foi realizada utilizando a prensa hidráulica com capacidade de 200 toneladas-força e matrizes paralelas, deformando o material de modo a atingir os diferentes níveis de deformação, ou seja, com diferentes reduções percentuais da altura dos corpos de prova (CPs) com altura inicial de aproximadamente 78 mm.

Após a conformação mecânica, os corpos de prova foram seccionados em uma direção perpendicular à direção de movimento do cabeçote móvel da prensa na operação de recalque. O corte foi realizado por meio de serra de fita no centro do corpo de prova na região central e as superfícies preparadas por meio de fresamento, de maneira a remover uma camada de aproximadamente 5 mm de material a fim de eliminar a solda de tamponamento do furo, como ilustrado na Figura 5.

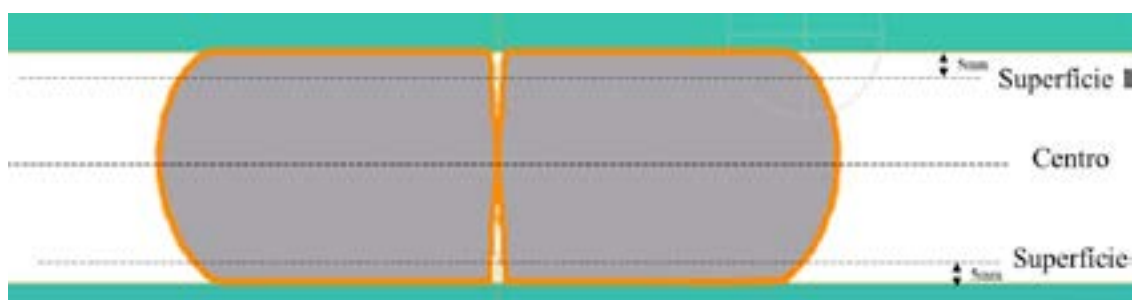


Figura 5 – Esquemático das regiões analisadas na simulação física de recalque.

A variação das dimensões dos diâmetros médios do furo localizados no ponto médio do corpo de prova deformado e próximo à superfície, após remoção da solda de tamponamento, pode ser verificada a

partir da Figura 6. No centro, o furo do corpo de prova apresenta um aumento no diâmetro de aproximadamente 80% em relação ao seu valor nominal, quando submetido a uma condição de 30% de recalque. Esse ponto representa o valor máximo, a partir do qual o diâmetro começa a diminuir consistentemente até atingir o completo fechamento do furo para uma deformação de 65%, como confirmado por meio do ensaio de líquido penetrante.

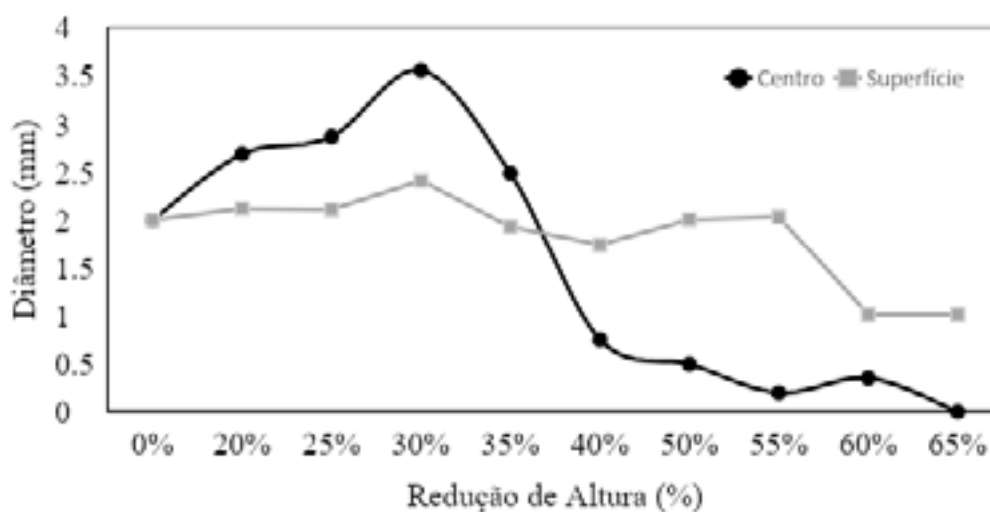


Figura 6 – Gráfico com os valores de diâmetro (mm) dos furos encontrados no eixo de simetria do corpo de prova após a realização de recalque.

Na posição subsuperficial, o comportamento exibe diferenças significativas em relação à região central. Permanece relativamente estável até ocorrer uma redução de 55%, a partir da qual o diâmetro diminui rapidamente. No entanto, ao contrário do resultado obtido na região central, o furo não se fecha completamente.

O comportamento descrito pode ser explicado pela hipótese da existência de uma zona de fluxo restringido (ZFR) formada na região da peça próxima à ferramenta. A ZFR é uma área em que o fluxo plástico do material é restringido devido à fricção entre a ferramenta e o material. Como resultado dessa restrição, a deformação na superfície é reduzida, o que conseqüentemente leva a uma menor variação no diâmetro. Essa hipótese parece se confirmar nas macrografias apresentadas nas Figuras 7 e 8.

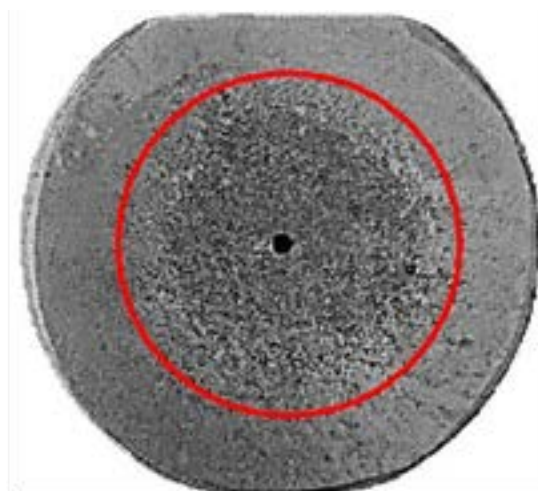


Figura 7 – Corpo de Prova com 35% de redução, submetido novamente a macrografia da seção transversal da região superficial (destaque para a ZFR).

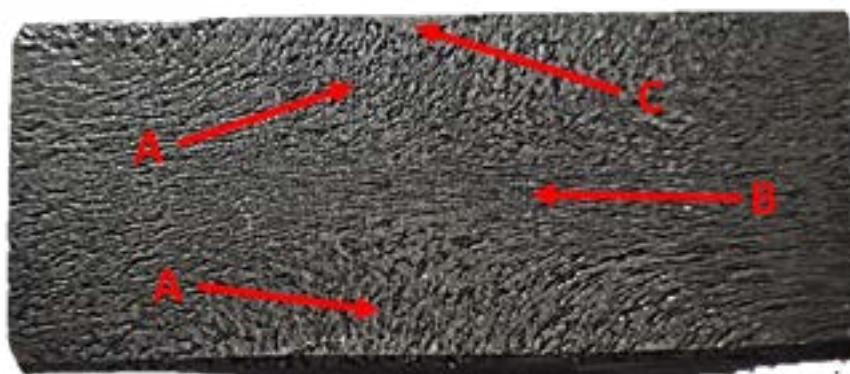


Figura 8 – Macrografia da seção longitudinal do corpo de prova com redução de 65% com destaque para: A) Zona de fluxo restringido B) Região de fibramento com fluxo livre C) Resquício da solda de tamponamento do furo.

3. Simulação numérica

Buscando gerar um modelo de simulação do processo de recalque do corpo de prova com uma correlação adequada para o processo de fechamento de vazios, foi construído um modelo no software QForm UK, utilizando as informações fornecidas em sua própria biblioteca para as propriedades do Aço 42CrMo. No contexto da modelagem, foi concebido um modelo axissimétrico, no qual foram distribuídos sensores ao longo do furo do corpo de prova com o intuito de monitorar a variação de diâmetro.

Os resultados das simulações numéricas se revelaram consonantes aos resultados obtidos por Villabón Ramos et al. (2003), no qual até aproximadamente 35 a 40% de redução de altura o material possui uma tendência a abrir o furo e essa tendência se inverte até seu completo fechamento. Observou-se que deformações mais elevadas resultaram em um maior fechamento dos vazios, o que sugere potencialmente uma redução na presença de defeitos internos. Esta observação é de particular interesse para a extrapolação desses resultados para o processo de recalque de lingotes em ambientes industriais. Para exemplificar, os resultados para as reduções de 35% e 65% estão apresentados nas Figura 9 e Figura 10, respectivamente.

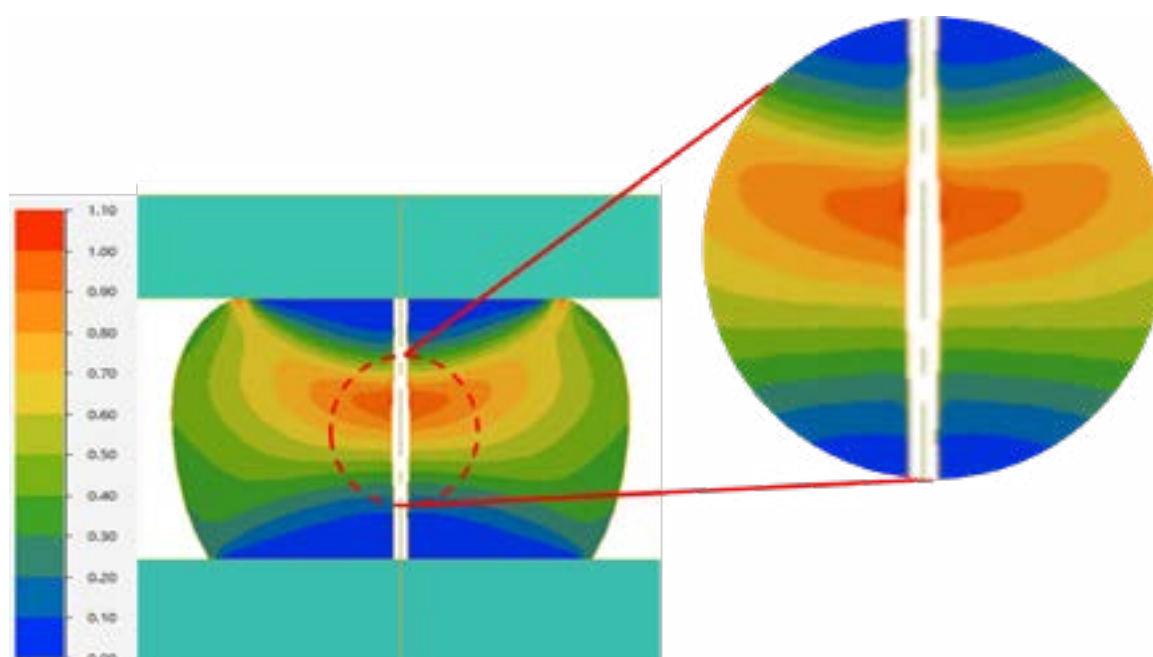


Figura 9 – Distribuição de deformação efetiva para uma deformação de 35% com destaque para a região com maior deformação efetiva.

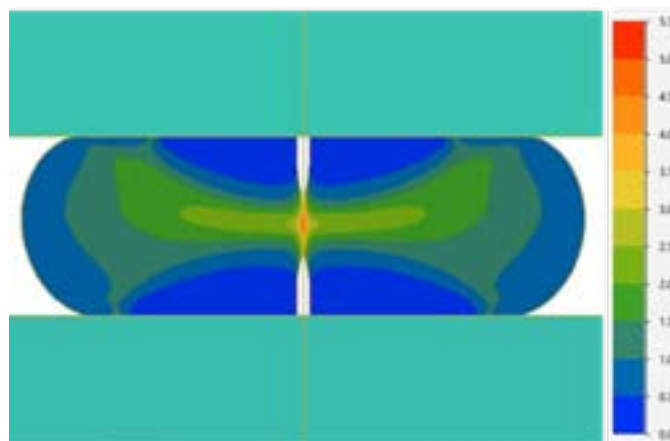


Figura 10 – Distribuição de deformação efetiva ao longo do corpo de prova após 65% de redução.

Os resultados obtidos a partir das simulações físicas e numéricas exibem um comportamento consistente no processo de recalque dos corpos de prova, em concordância com a literatura (Hawkyard; Johnson, 1967; Lee et al., 2011; Park, 2018; Zhang et al., 2009), mostrando uma tendência de abertura do furo para deformações mais baixas e uma inversão dessa tendência a partir de uma certa deformação. Uma comparação entre os resultados físicos e numéricos pode ser verificada na Figura 11.

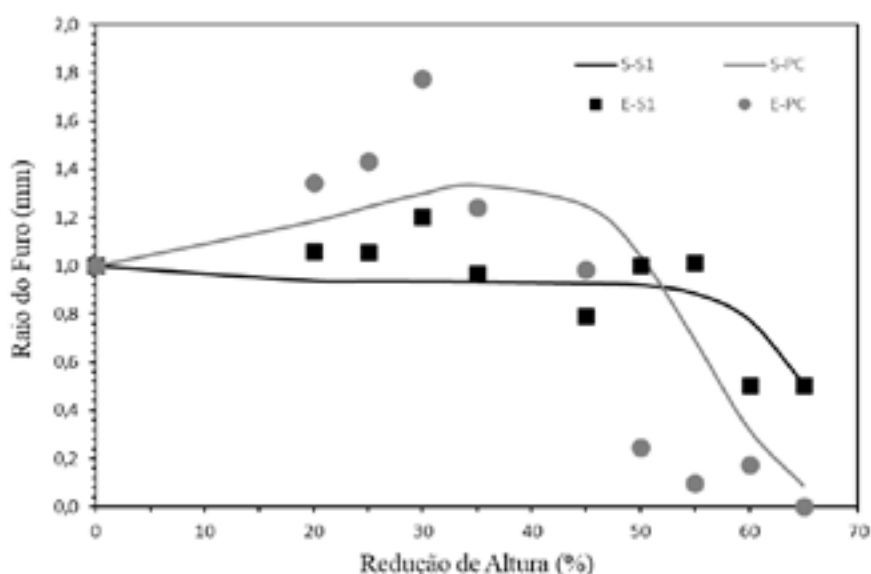


Figura 11 – Gráfico combinado da variação do raio do furo em função da redução de altura durante a simulação para a superfície 1 (S-S1) e central (S-PC) e para o experimento físico (E-S1 superfície e E-PC central).

No contexto apresentado, fica evidente a importância da consideração de validação de modelos e caracterização de resultados experimentais. A análise dos dados experimentais e a comparação com as simulações apresentadas corroboram a ideia de que a validação vai além da calibração do modelo numérico em si, apresentando evidências adicionais que parecem validar as hipóteses levantadas para o comportamento do material durante recalque, como por exemplo a caracterização física da microestrutura da zona de fluxo restringido.

A análise da evolução da geometria da descontinuidade, modelada a partir de um furo passante de 2 mm, permitiu a avaliação das condições e parâmetros envolvidos no recalque e o entendimento do comportamento do material sob essas condições e a possível correlação com o mecanismo de fechamento de vazios durante o processo de forjamento. Demonstra-se que a condição de atrito é um

fator central no comportamento do material e parece desempenhar papel importante no fechamento de vazios, como evidenciado nas análises comparativas entre os resultados.

4. Conclusões

A correlação entre a simulação numérica do recalque a quente em matriz aberta e a experimentação física, mostra-se uma ferramenta eficiente na avaliação do comportamento de um vazio durante o processo de conformação mecânica que pode ser de grande valia para o entendimento dos fenômenos de fechamento de vazios provenientes da solidificação de lingotes utilizados para a produção de grandes peças forjadas.

Na simulação numérica, o resultado foi condizente com o observado no experimento físico, com o diâmetro máximo do furo atingindo uma deformação de 30% no ponto médio do modelo. Logo, a comparação entre os resultados obtidos na simulação numérica e no experimento físico demonstrou uma consistência significativa. Essa correlação valida o modelo de simulação utilizado, reforçando sua utilidade como uma ferramenta poderosa para a previsão e análise do processo de recalque em peças forjadas de grande porte.

Além disso, é possível afirmar que variações nas condições de atrito podem afetar significativamente a forma como os vazios se fecham durante o processo de forjamento, por meio de formações de zonas de fluxo restringido e sua influência na distribuição de deformações ao longo do material. Essa influência, por sua vez, tem implicações diretas na prática industrial do forjamento, já que as condições de atrito afetam a qualidade superficial das peças produzidas, a vida útil das ferramentas utilizadas, heterogeneidade de microestrutura do material e a carga de forjamento em si.

REFERÊNCIAS

ERMAN, E. *et al.* Physical modeling of the upsetting process in open-die press forging. **Journal of mechanical working technology**, v. 19, n. 2, p. 195-210, 1989.

LEE, Min Cheol *et al.* Finite element simulation of pore closing during cylinder upsetting. **International Journal of Modern Physics B**, v. 22, n. 31n32, p. 5768-5773, 2008.

HAWKYARD, J. B.; JOHNSON, W. An analysis of the changes in geometry of a short hollow cylinder during axial compression. **International journal of mechanical sciences**, v. 9, n. 4, p. 163-182, 1967.

PARK, Jong-Jin. Prediction of void closure in metal forming: One cylindrical through-hole. **ISIJ International**, v. 58, n. 6, p. 1102-1107, 2018.

VILLABÓN RAMOS *ET AL.*, Leonardo; STANQUINI, Helder Riva; PÉREZ RUIZ, Eduardo Alberto; SOUZA, Roberto Martins de; SINATORA, Amilton. Estudo do comportamento dimensional de furos em corpos-de-prova submetidos à operação de recalque. **Anais**. Uberlândia: ABCM, 2003.

ZHANG, Xiao-Xun *et al.* A criterion for void closure in large ingots during hot forging. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, n. 4, p. 1950-1959, 2009.

Avaliação dos sistemas de lubrificação e seus lubrificantes no forjamento a frio

Marcia Beatriz Debatin ⁽¹⁾

Luciano Pinotti ⁽²⁾

A lubrificação no forjamento a frio pode ser considerada umas das etapas mais importantes do processo. O presente trabalho apresenta um comparativo entre o sistema convencional de lubrificação e o sistema curto de lubrificação (SLS). O sistema convencional de lubrificação para o forjamento a frio é composto por produtos de Fosfato para ancoragem seguido de um sabão, bissulfeto de molibdênio ou grafite. Já no sistema curto de lubrificação, o processo de ancoragem não necessita de produtos de fosfato, mas de um ativador específico para o preparo da superfície metálica e o lubrificante pode ser os usados no sistema convencional, assim como polímeros. Para a comparação dos processos, três grupos de peças foram montados, o primeiro, lubrificado no modo convencional com fosfato de zinco-ferro e bissulfeto de molibdênio, o segundo, passando pelo SLS com bissulfeto de molibdênio, e o terceiro também passando pelo SLS mas com lubrificante polimérico. As peças possuem um processo de conformação conhecido e consolidado, e a avaliação se dá por meio do dimensional da peça, características visuais e uma avaliação da possibilidade de limpeza das peças.

Palavras-chave: Conformação a frio, lubrificação, fosfatização, bissulfeto de molibdênio, polímero.

Lubrication systems and lubricants evaluation on cold forging

Lubrication in cold forging can be considered one of the most important steps in the process. The present work presents a comparison between the conventional lubrication system and the short lubrication system (SLS). The conventional lubrication system for cold forging is composed of phosphate products for anchoring followed by soap, molybdenum disulfide or graphite. In the short lubrication system, the anchoring process does not require phosphate products, but a specific activator for metal surface preparation and the lubricant can be those used in the conventional system, as well as polymers. To compare the processes, three groups of parts were assembled, the first, lubricated in conventional mode with zinc-iron phosphate and molybdenum disulfide, the second, passing through SLS with molybdenum disulfide, and the third also passing through SLS but with polymeric lubricant. The parts have a known and consolidated forming process, and the evaluation takes place through the dimensions of the part, visual characteristics and an assessment of the possibility of cleaning the parts.

Keywords: Cold forming, lubrication, phosphating, molybdenum disulfide, polymer.

⁽¹⁾ Açopecas Ind. de Peças de Aço Ltda. (marcia.debatin@acopecas.com.br)

⁽²⁾ Açopecas Ind. de Peças de Aço Ltda. (pinotti@acopecas.com.br)



1. INTRODUÇÃO

A lubrificação desempenha um papel crucial no processo de forjamento a frio, uma técnica metalúrgica fundamental na fabricação de peças e componentes de alta precisão. Neste contexto, a lubrificação não apenas reduz o desgaste das ferramentas e prolonga sua vida útil, mas também melhora a qualidade das peças forjadas, garantindo uma distribuição uniforme da pressão e minimizando defeitos superficiais.

No contexto do forjamento a frio, que envolve a deformação plástica de metais sem aquecimento prévio, a lubrificação desempenha um papel duplo. Em primeiro lugar, ela reduz o atrito entre a matriz e a peça de trabalho, minimizando o desgaste das ferramentas e melhorando a qualidade superficial das peças forjadas. Em segundo lugar, a lubrificação adequada facilita a conformação das peças, permitindo uma distribuição uniforme da pressão e evitando distorções indesejadas. Além disso, a escolha do lubrificante adequado também influencia a temperatura gerada durante o processo, o que por sua vez pode afetar as propriedades mecânicas do material final. Portanto, entender os diferentes tipos de lubrificantes disponíveis e sua aplicação correta no forjamento a frio é essencial para assegurar a qualidade e a eficiência da produção industrial.

De modo comparativo, os processos convencionais de lubrificação, conhecidos pelo termo de fosfatização, utilizam principalmente camadas de ancoragem proveniente de banhos de fosfato ferro ou ferro-zinco e camadas de lubrificante a base de sabão (estearato) ou bissulfeto de molibdênio. Já os métodos mais recentes de lubrificação, utilizam uma camada de ancoragem menos agressiva, com utilização de menor número de banhos e aliado com lubrificantes a base de bissulfeto de molibdênio ou polímeros.

1.1 Processo de Lubrificação

No processo de lubrificação convencional, a fosfatização, uma camada de conversão (química) de fosfato de zinco ou uma película mista de fosfato de zinco e fosfato de ferro e zinco é formada na superfície do aço. Esta camada é extremamente aderente e fornece a base para anti-gripagem, ao mesmo tempo que apoia a lubrificação e fornece proteção contra corrosão. Numa etapa subsequente, esta camada de fosfato é normalmente tratada com sabões para criar uma camada de, por exemplo, estearato de zinco. O processo como um todo pode ter mais do que 10 etapas, levando um maior tempo para as peças estarem disponíveis para conformação.

A fosfatização inicia-se com uma limpeza das peças a serem lubrificadas, podendo ser uma limpeza mecânica por meio de jateamento ou uma limpeza química por meio de decapantes e desengraxantes. A segunda etapa se dá por um ativador, que prepara a superfície para receber a camada de fosfato, seguida por um enxágue. Em alguns casos, o banho de Ativador pode ser aplicado uma segunda vez, dependendo do nível de agitação do banho e das peças. Após o banho de Fosfato, um ou dois enxágues são realizados para remover qualquer resquício do banho das peças e dos cestos, assim segundo para um banho Neutralizador e um banho de lubrificante, sendo sabão ou bissulfeto de molibdênio.

Com os banhos químicos realizados, um tamboreamento é realizado, para aderir a camada de lubrificante sobre o material e as peças são deixadas para secar, processo que dura algumas horas e podem ser usadas por no máximo 5 dias após a aplicação do lubrificante ou sem sinais de corrosão na superfície.

Todo o processo convencional pode levar em torno de 50 minutos para as primeiras peças estarem prontas para secar e apenas posteriormente para a conformação.

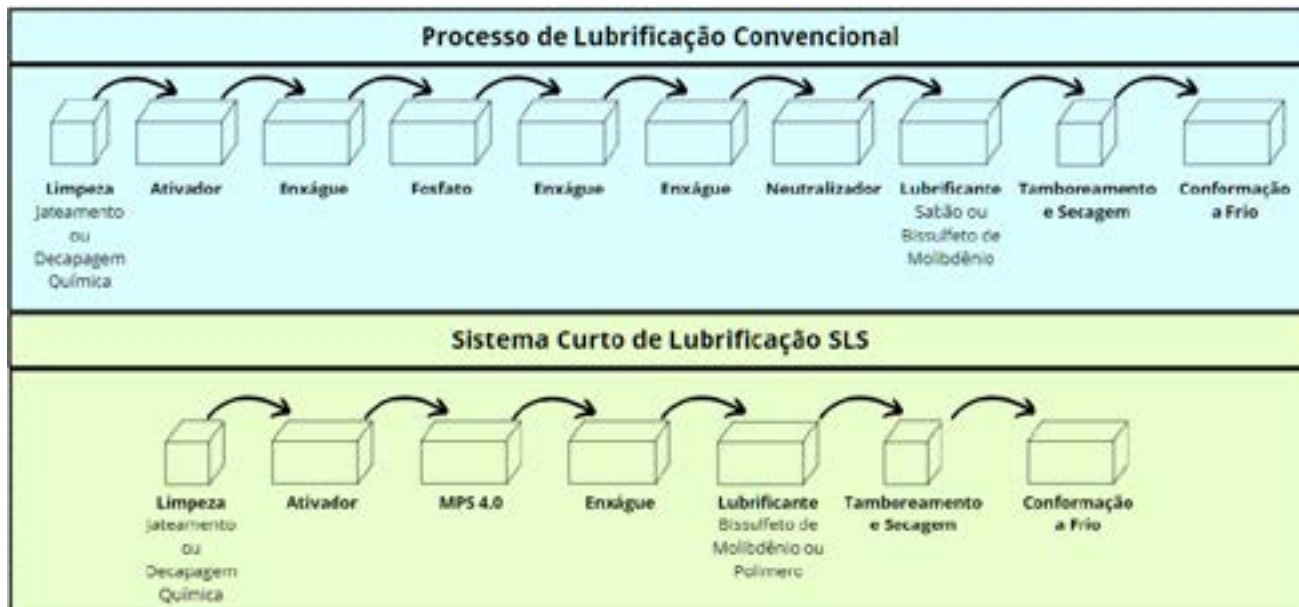


Figura 1. Comparativos dos processos de lubrificação.

Para o processo do Sistema Curto de Lubrificação, após o processo de limpeza das peças, elas seguem para o banho de Ativador e em seguida para o banho do Preparador MPS 4.0, que substitui o banho de fosfato. Seguindo para um enxágue e aplicação da camada lubrificante, sendo esse o bissulfeto de molibdênio ou polímero, sendo os sabões não compatíveis com o SLS.

Após o tamboreamento, as peças secam em pouco tempo e já estão disponíveis para conformação. No processo SLS, o tempo de aplicação dos banhos diminui se comparado com o processo convencional, assim como o tempo de tamboreamento, levando em torno de 30 minutos para as primeiras peças estarem secas e prontas para a conformação.

2. METODOLOGIA

Para a avaliação dos processos, 3 grupos de controle foram montados, cada qual composto por 125 peças, sendo que a geometria das peças é conhecida e o processo já consolidado. Os grupos foram selecionados de modo a avaliar o Processo Convencional de Lubrificação (Fosfatização) com bissulfeto de molibdênio, o SLS com bissulfeto de molibdênio e o SLS com polímero.

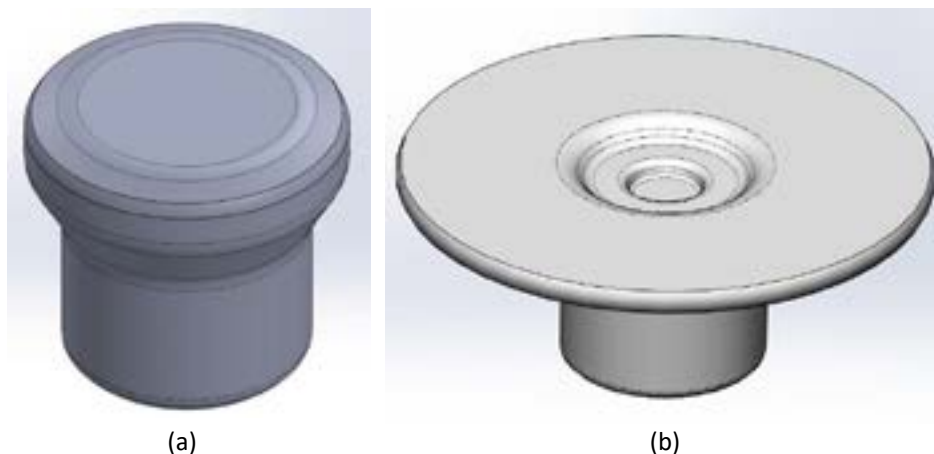


Figura 2. Peça escolhida para realizar o teste: (a) pré-forma e (b) geometria da operação.

A peça é caracterizada por uma extrusão para trás na parte de baixo e um recalque de fluxo lateral na aba. As pré-formas foram passadas pelas linhas de lubrificação de acordo com a montagem dos seus respectivos testes, conforme mostrado na fig. 3.

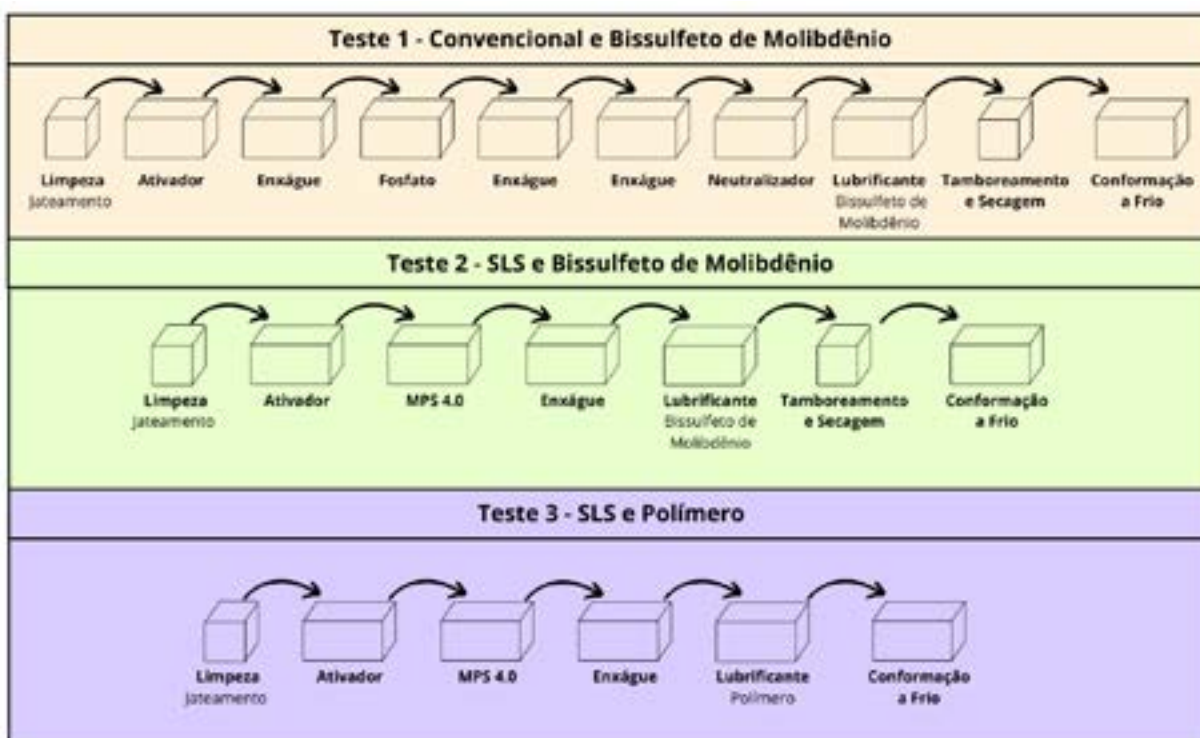


Figura 3. Esquema dos testes realizados.

Para a avaliação das peças resultantes dos 3 testes, um ensaio de capacidade dimensional das características de espessura e diâmetro da aba foi realizado e assim os índices de performance do processo, Cp e Cpk, avaliados. Ainda de modo a avaliar o processo, duas outras características foram avaliadas, sendo elas um teste para possível limpeza das peças e a verificação da duração da camada protetora de lubrificante após a conformação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a avaliação dividiremos os resultados em 3 tópicos: Análise de capacidade e desempenho do processo; Limpeza posterior das peças; e Duração de Camada Protetora.

3.1 Análise de Capacidade e Desempenho do Processo

A avaliação do processo foi realizada do mesmo modo para os 3 testes, apresentando os resultados na Tab. 1 quanto o Cp e Cpk do diâmetro e da espessura da aba, e as figuras mostram os gráficos de desempenho de cada um dos estudos realizados.

Tabela 1. Resumo dos resultados de Performance do Processo para os testes realizados.

Resultados de Performance do Processo						
Característica	Teste 1		Teste 2		Teste 3	
	Ø Aba	Espessura	Ø Aba	Espessura	Ø Aba	Espessura
Cp	2,5632	3,1775	2,4703	2,9368	2,3284	2,9147
Cpk	2,5632	3,0478	2,4703	2,3024	2,3284	1,5226

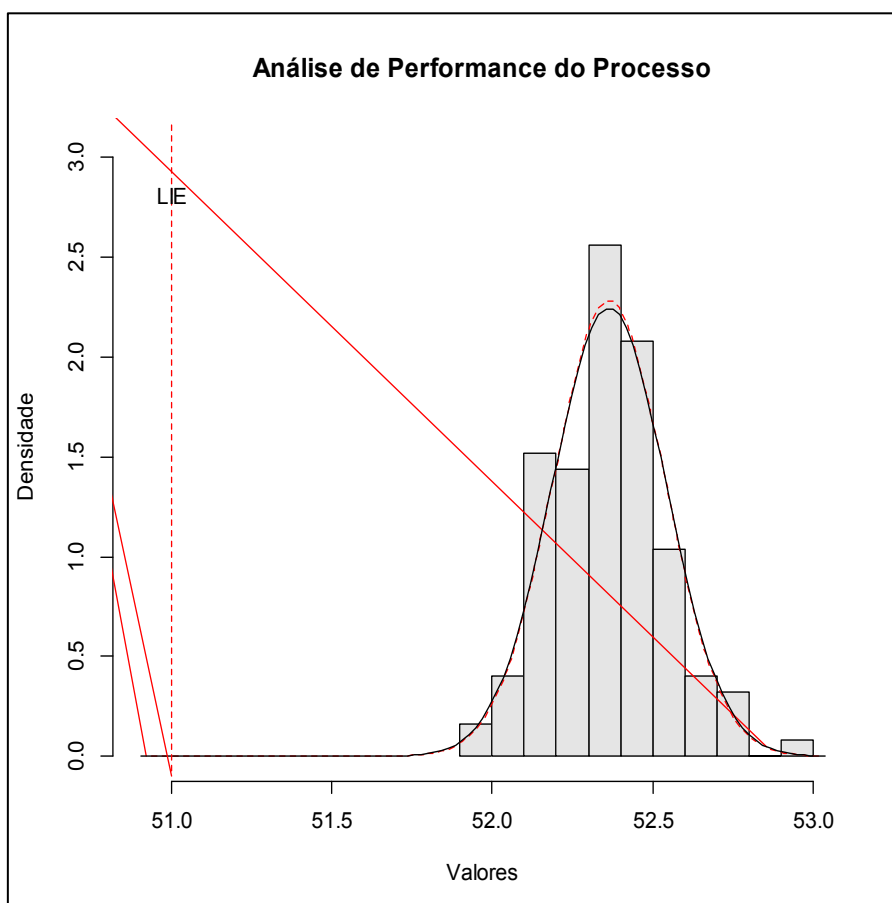


Figura 4. Gráfico de Análise de performance do processo referente ao diâmetro da aba no teste 1.

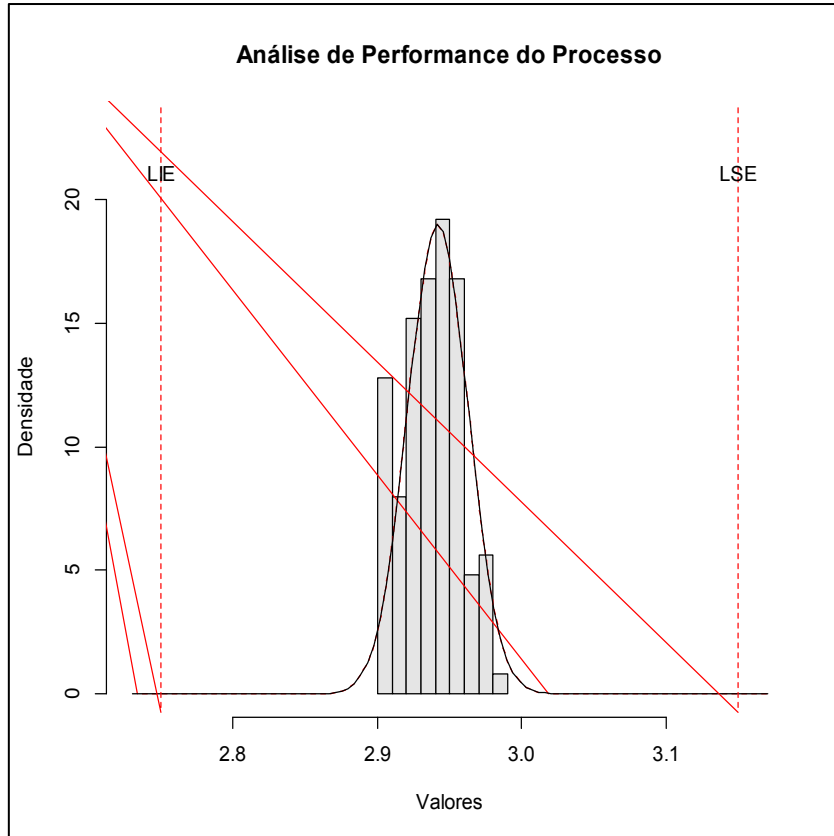


Figura 5. Gráfico de Análise de performance do processo referente a espessura da aba no teste 1.

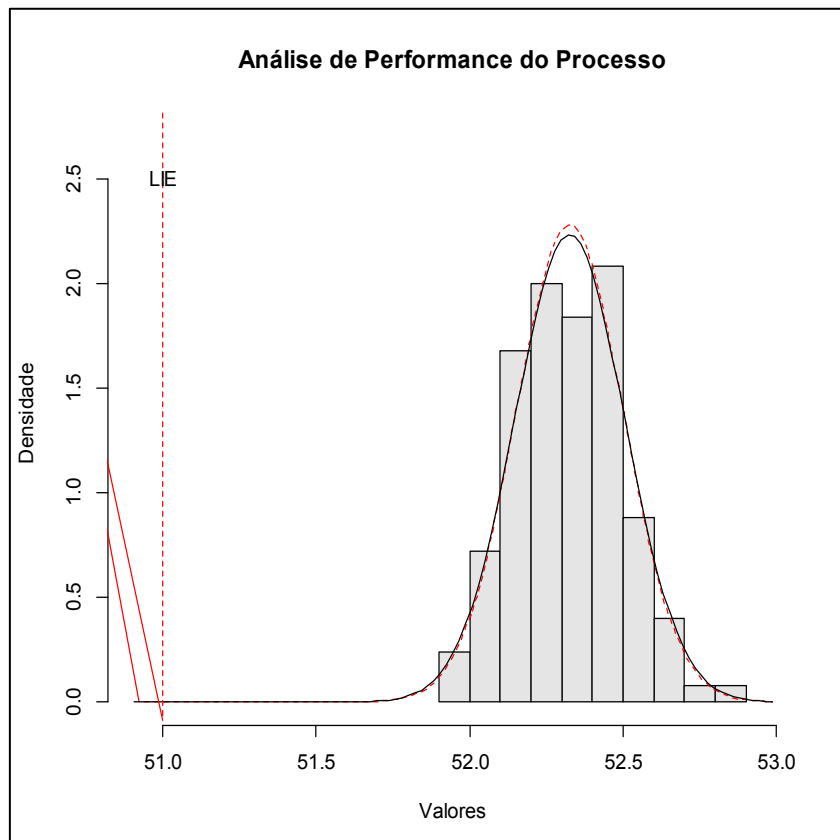


Figura 6. Gráfico de Análise de performance do processo referente ao diâmetro da aba no teste 2.

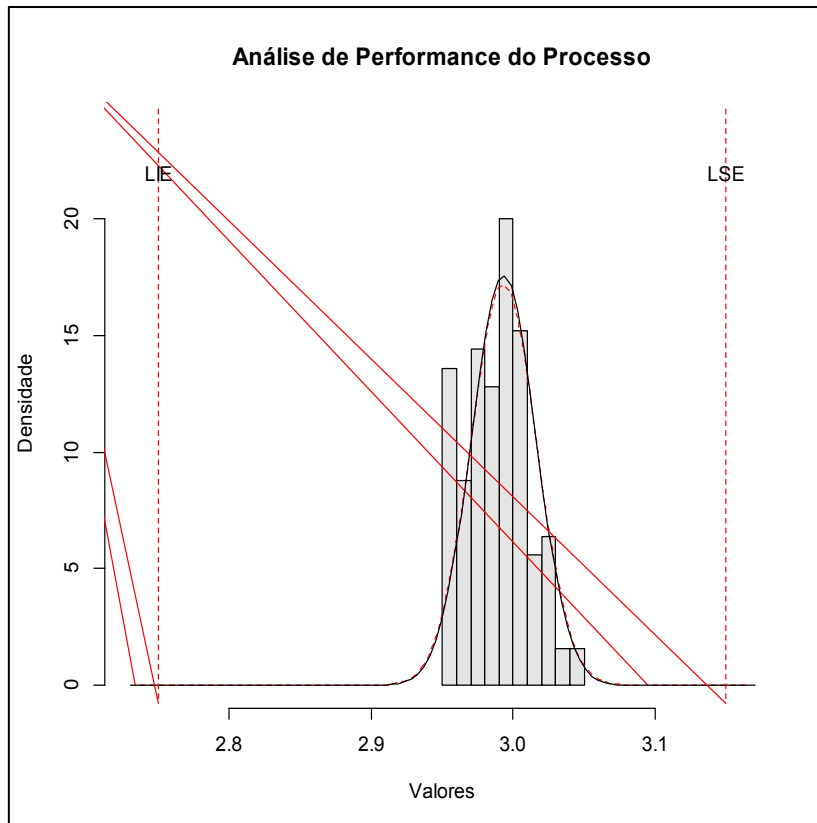


Figura 7. Gráfico de Análise de performance do processo referente a espessura da aba no teste 2.

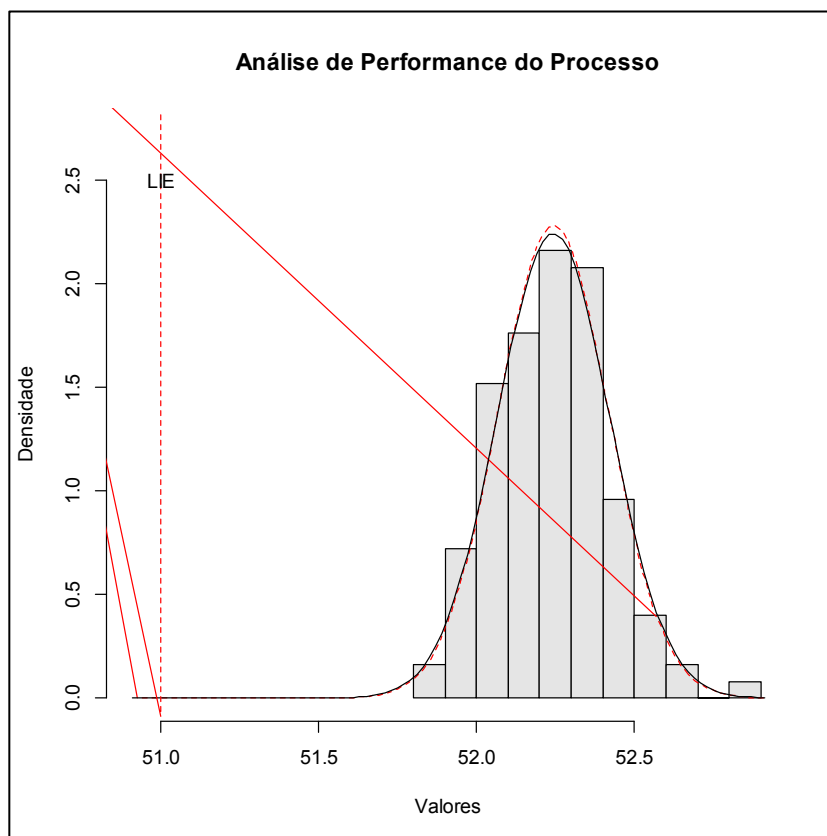


Figura 8. Gráfico de Análise de performance do processo referente ao diâmetro da aba no teste 3.

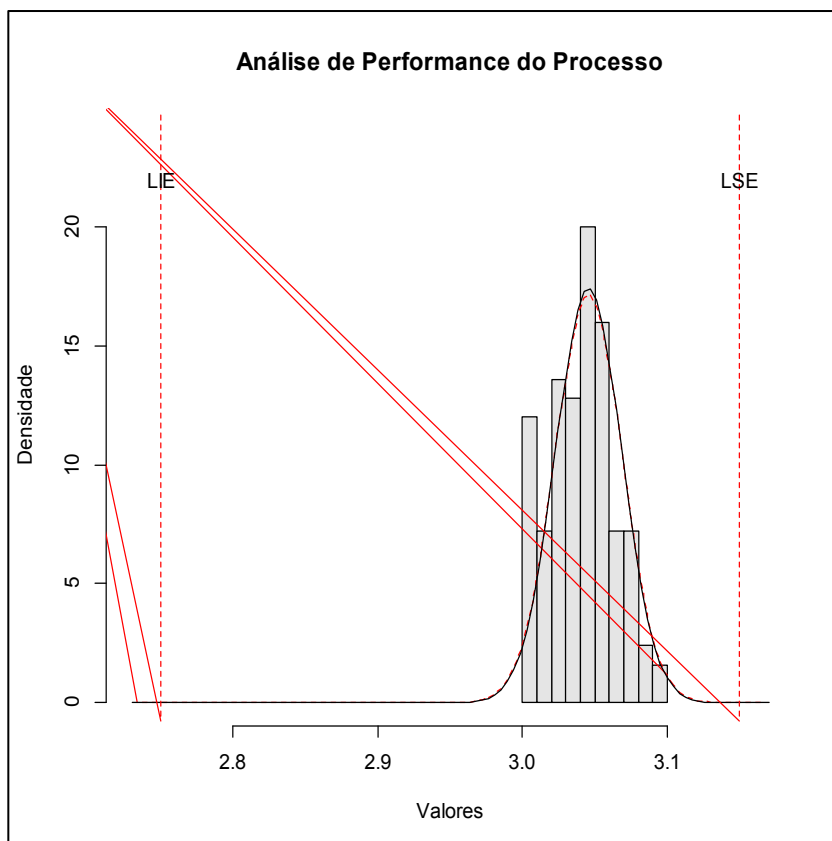


Figura 9. Gráfico de Análise de performance do processo referente a espessura da aba no teste 3.

Com base nas imagens dos processos, podemos ver que os testes 1 e 2, fig. 4 a 7, ambos que utilizam o bissulfeto de molibdênio, mostraram um diâmetro maior e espessura menor na aba, implicando em um escoamento maior de material e uma maior eficiência do lubrificante. Para o teste 3, temos um diâmetro menor e uma espessura, mas ainda dentro dos parâmetros de processo estabelecidos.

3.2 Limpeza das Peças

Como fator diferencial no processo, o quesito limpeza engloba a facilidade de limpeza das peças após a conformação e sua interação com óleo protetivo aplicado.



Figura 10. Peças após a conformação: (a) Teste 1; (b) Teste 2; (c) Teste 3.

Para os testes 1 e 2, a camada e resíduo de Bissulfeto de molibdênio apresenta característica mais uniforme quanto a aparência, mas quando colocado junto ao óleo, o resíduo se solta,

quando olhamos para a peça do teste 3, mesmo a camada apresentando aspecto não uniforme, quando em contato com o óleo, não apresenta desprendimento de resíduos.

Quando a limpeza posterior, as peças com camada de bissulfeto de molibdênio necessitam de um processo de decapagem química para limpá-las, enquanto as peças do teste 3, com polímero, uma lavagem com água já apresenta ser suficiente para remover o excesso de camada, conforme podemos ver na fig. 11.



Figura 11. Peça do teste 3 após lavagem com água.

3.3 Duração de Camada Protetora

Com base nas características do processo, a proteção contra corrosão após o processo de conformação, as peças do teste 1 e 2 apresentam tempo reduzido de proteção, algo em torno de 1 ou 2 semanas, considerando as condições climáticas. Já a proteção para as peças do teste 3, se mantido a camada do lubrificante, a proteção pode se estender por meses. A fig. 12 mostra um comparativo de peças do teste 1, 2 e 3 com o tempo de 2 meses após a conformação.



Figura 12. Peças do teste 1, 2 e 3, respectivamente, após 2 meses da conformação.

4. CONCLUSÃO

Em conclusão, a análise detalhada dos processos de lubrificação convencional e do Sistema Curto de Lubrificação (SLS) revelou algumas diferenças em termos de desempenho, limpeza e durabilidade da camada protetora de lubrificante.

No que diz respeito à capacidade e desempenho do processo, os resultados demonstram que os testes que utilizaram bissulfeto de molibdênio (testes 1 e 2) mostraram um melhor desempenho,



com diâmetros maiores e espessuras menores na aba, indicando um escoamento mais eficiente do material. Por outro lado, o teste 3, que empregou polímero como lubrificante, ainda estava dentro dos parâmetros de processo, mas apresentou um desempenho ligeiramente inferior.

Em relação à limpeza posterior das peças, foi observado que as peças com camada de bissulfeto de molibdênio requeriam um processo de decapagem química para remoção dos resíduos, enquanto as peças do teste 3, com polímero, podiam ser limpas com água, demonstrando uma vantagem em termos de facilidade de limpeza.

Por fim, quanto à duração da camada protetora, as peças dos testes 1 e 2 apresentaram uma proteção contra corrosão mais curta, de aproximadamente 1 a 2 semanas, sob condições climáticas normais, enquanto as peças do teste 3, com polímero, mostraram uma proteção mais duradoura, podendo se estender por meses após a conformação.

Portanto, a escolha entre os diferentes processos de lubrificação depende das necessidades específicas do projeto, considerando fatores como desempenho, facilidade de limpeza e proteção contra corrosão. Cada método tem suas vantagens e limitações, e a decisão deve ser baseada em uma avaliação abrangente das prioridades e requisitos do processo de fabricação.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido em parceria com a empresa ZWEZ Química do Brasil e todos os produtos utilizados nas linhas de lubrificação apresentadas são de sua produção.

REFERÊNCIAS

PEYCHEVA, Ralitsa. Using Polymer Lubricants to Optimize Cold Forging. **Forging Magazine: Forming Technology**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 22-24, jul. 2015.

Hu, C., Osaki, S., Cai, B. et al. **Evaluation of dry-in-place lubricants for cold forging by using an optimal steady combined forward and backward extrusion testing method**. *Friction* 11, 1862–1876 (2023). <https://doi.org/10.1007/s40544-022-0717-3>

Karunathilaka, N.; Tada, N.; Uemori, T.; Hanamitsu, R.; Fujii, M.; Omiya, Y.; Kawano, M. **Effect of Lubrication and Forging Load on Surface Roughness, Residual Stress, and Deformation of Cold Forging Tools**. *Metals* 2019, 9, 783. <https://doi.org/10.3390/met9070783>

Simulation-Driven Design for Metal Forming Processes: Advancements, Case Studies, and Future Perspectives

Stanislav Kanevskiy^{a,*}, Nikolay Biba^b, Andrey Vlasov^c, Jiawei Gu^d

^a*QForm Group FZ LLC, Fujairah-Creative Tower, P.O. Box 4422, Fujairah, United Arab Emirates*

^b*Micas Simulation Ltd., 107 Oxford Road, Oxford, OX4 2ER, UK*

^{c,d}*Bauman Moscow State Technical University*

* Corresponding author. Tel.: +972 50 4847750; E-mail address: stas@qform3d.com

Abstract:

Metal forming simulation has taken the processes of the analysis and improvement of metal forming processes to the next level, providing accurate predictions of the finish product shape, possible defects, stress and strain distributions in workpieces and tools, temperature, load and other critical parameters. However, finding out an optimal preform design and the best forging parameters still relies on engineers' expertise. To make the development process faster, a simulation-driven design has emerged as a promising methodology, enabling the automated design of preforming tools starting from the 3D geometry of the finish forging dies. It is based on the use of the equipotential surfaces as an approximation of the preform shape and further creating of the preform dies. The paper presents special QForm Direct software and, through a practical case study, demonstrates how the industry can move from traditional trial-and-error methodologies to a more automated, precise, and cost-effective approach.

Keywords: hot forging; preform design; FEM; QForm; simulation, tools, preliminary dies

INTRODUCTION

Metal forming is a complex manufacturing process that involves the deformation of metal workpieces to achieve the desired shape. Traditionally, the development of forming technologies heavily relied on empirical methods, often leading to time-consuming and costly trial-and-error attempts. However, the advances in metal forming simulation have transformed how engineers approach process design and optimization.

Simulation tools provide invaluable insights into the behaviour of materials during forming, enabling engineers to predict and evaluate various process parameters. This allows for the virtual exploration of different design alternatives, minimizing the need for physical prototypes and reducing development time and costs.

Nowadays many forging companies use FEM simulation software to avoid defects in the developed technologies. Currently, it is a vital tool to be able to compete in this market. While simulation has been widely adopted in the metal forming industry, the challenge remains in determining the optimal technology at the stage of its design. Particularly difficult to develop the preform (blocker) tool designs to achieve defect-free in complex shape closed die forging technology.

This paper presents the principles and capabilities of QForm Direct, focusing on the concept of simulation-driven design in metal forming processes. The software solution was specifically developed for the purpose of automated preform die design. Together with the QForm UK simulation software it not only predicts material behavior and process outcomes but also guides the design of forging dies. Utilizing case studies from the industry, we illustrate the potential of this approach to enhance process efficiency, reduce material waste, and avoid surface defects.

THE FUNCTIONALITY AND APPLICATION OF QFORM DIRECT

QForm Direct is based on the method of equipotential surfaces for forging preform design. This methodology uses a potential flow approximation derived as solutions of the Laplace equation [1]. The method is based on the assumption that the preform shape in metal forming processes plays a vital role in determining the final quality of the product. The theoretical background and historical overview of the method implementation in metal forming can be found in [2]. QForm Direct utilizes the equipotential surface approach that is related to a hypothetical ideal flow of incompressible material with no rotational velocity vector component, which would otherwise lead to the formation of laps or folds [3]. This approach ensures more uniform metal flow, reducing defects and making it easier to fill a finished die completely. The method also helps to fill the dies with minimal flash and reduces forming load and avoids flow defects like laps and flow-through.

One of the key features of QForm Direct is the semi-automatic design of preliminary forging impressions. The software also allows automated geometry data transfer to QForm UK simulation software saving significant time and resources for the simulation preparation. In addition, it enables more automation in 3D die geometry design and its optimization, which promises further advancements in the field.

The application of QForm Direct is versatile and covers both cold and hot closed die forgings. Special algorithms of QForm Direct generate near-optimal preforming dies surfaces in an automated way based only on the geometry of the finish dies. An engineer is still responsible for the correct design of the finish dies and flash gutter geometry.

QForm Direct has been successfully implemented for the design of forging impressions for axisymmetric and complex shape parts and even in the optimization of the manufacturing process for gear sectors. In each of these applications, QForm Direct has consistently demonstrated its effectiveness in reducing material waste, lowering forging loads, and improving the overall quality of the finished product while the development of the optimal preforming tools design was automated and significantly speeded up compared to traditional manual design.

Traditionally, the design of preform shapes relies heavily on trial-and-error methods, which can be both time-consuming and resource-intensive. However, with QForm Direct, engineers can design the optimal preform shape through a simulated environment, reducing the need for in-metal tests and resulting in significant cost and time savings.

SIMULATION-DRIVEN DESIGN IN METAL FORMING:

THE USE OF EQUIPOTENTIAL SURFACES:

Hot closed-die forging leverages equipotential surfaces for optimized preform shape creation, a strategy central to QForm Direct's simulation methodology. These surfaces, derived from potential flow approximations, initiate a preform design process that prioritizes uniform die filling and minimizes flow defects.

The versatility of QForm Direct was put to the test in developing a hot forged arm preform shape. The software was used to create preforming dies, and the simulation showed no laps in the preform and

complete filling of the die cavity. The resulting dies were manufactured and test, producing a high-quality finished part. [4]

OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS:

The simulation-driven design extends far beyond predicting material flow and reducing defects. It also allows for optimising various technological parameters, leading to a more efficient, productive, and cost-effective metal forming process. QForm UK, with its robust API, offers comprehensive solutions in this regard.

The optimization of technological parameters in metal forming is a complex process due to the interdependent nature of these parameters. QForm UK's API enables the programmable control of the simulation environment, allowing advanced optimization algorithms to adjust these parameters and seek optimal forging results iteratively.

This automated approach saves considerable time and resources while improving outcomes such as die fill, load capacity, and minimizing material waste. However, the journey of simulation-driven design optimization comes with the need for advanced optimization techniques and powerful computational capabilities. Despite these challenges, it remains a promising domain with immense potential. This paper, however, focuses on QForm Direct's implementation in preform design using equipotential surfaces, saving the complex topic of parameter optimization for future exploration.

INTEGRATION OF CAD AND SIMULATION SOFTWARE:

The integration of CAD and simulation software is a key aspect of simulation-driven design. By establishing a bi-directional data exchange between the two software platforms, engineers can seamlessly transfer geometry, material properties, and simulation results. This integration enables iterative design modifications based on simulation feedback, leading to improved product quality and process efficiency.

CASE STUDY: ALUMINIUM HOT CLOSED-DIE FORGED PREFORM DESIGN

Below is an industrial case of a hot closed die forging of an aluminium automotive part. Due to the high ductility of aluminium alloys in a hot state, it is a common practice to forge even complicated shapes in one or a maximum of two operations while the first operation is usually a simple preforming like upsetting or bending. This approach was tested for the given part using numerical simulation. A round bar with a diameter of 38 mm and a length of 220 mm made of AA 6082 aluminium alloy (3.2315 DIN) heated to 520 C is used as a billet. The equipment is a 1600-ton screw press. Fig.1 shows the simulation of the bending operation (Fig.1 a,b) and finish forging (Fig.1 c,d). Even though this technology variant provides complete filling of the die (Fig. 2a), severe laps appear in the finished part. The laps are highlighted by red spots in Fig. 2b, and the flow-through defects are indicated by red zones along the part ribs in Fig. 2c.

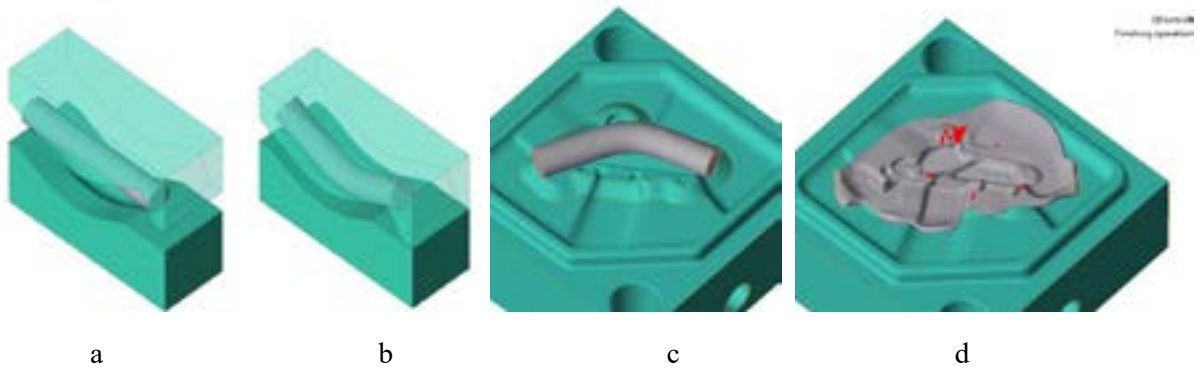


Fig. 1. The bending (a,b) and finish forging operations (c,d) simulated in QForm

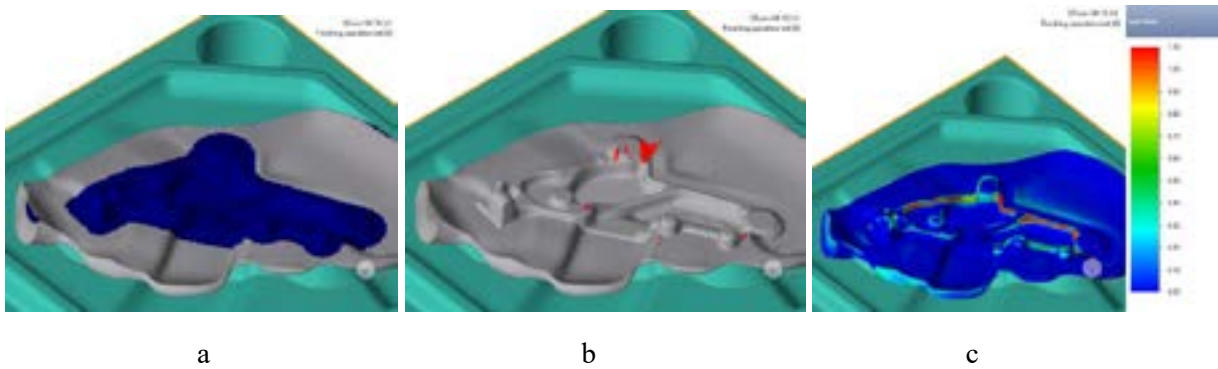


Fig. 2. The finish forging operation simulated in QForm: the die fills indication (a), laps (b) and flow-through defects (c).

Having these results, we decided to include one more intermediate operation and develop the preforming die shape using QForm Direct software. The equipotential surfaces generated by the program and used for creating preforming die cavities are shown in Fig. 3.

Thus, the modified technology consists of bending operation, preforming and final forging operations (Fig. 4). The forging sequence using this preform shape was simulated, and it did not show any defect in the finished part (Fig. 5).



Fig. 3. The equipotential surfaces generated by QForm Direct and used for the creation of the upper (a) and the bottom (b) preforming dies cavities.

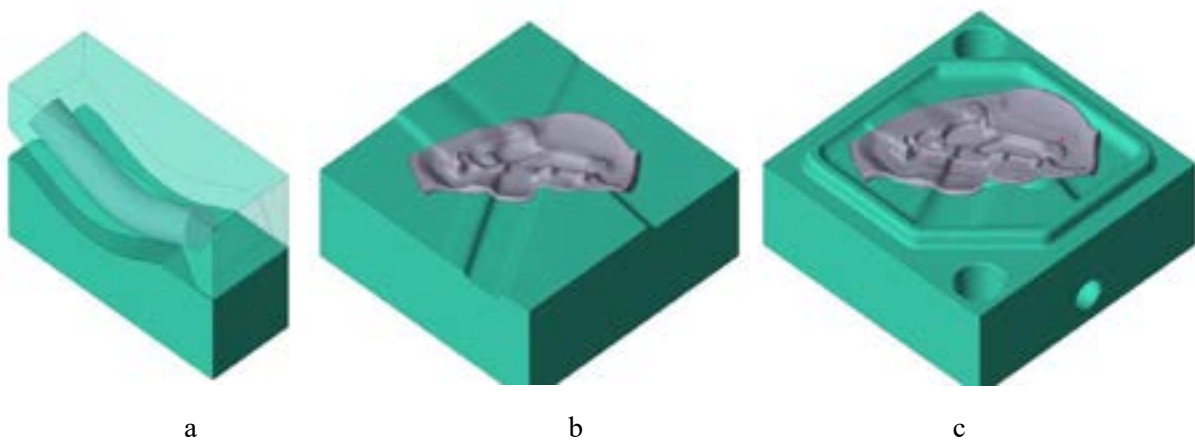


Fig. 4. The bending (a), preforming (b) and finish (c) forging operations as the stages of newly developed technology simulated in QForm UK for numerical verification.

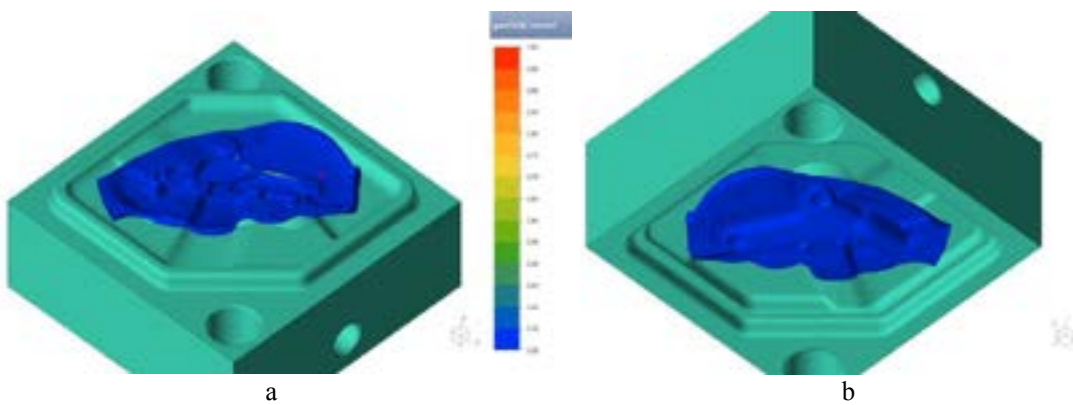


Fig. 5. Flow-induced defects analysis in finished forged part. No defects on the upper (a) and lower (b) surfaces were predicted by the Gartfield indicator.

After successful verification of the modified technology by means of simulation, the preform dies were manufactured (Fig. 6a) while finish dies were left without any alteration as they have initially designed (Fig. 6b).

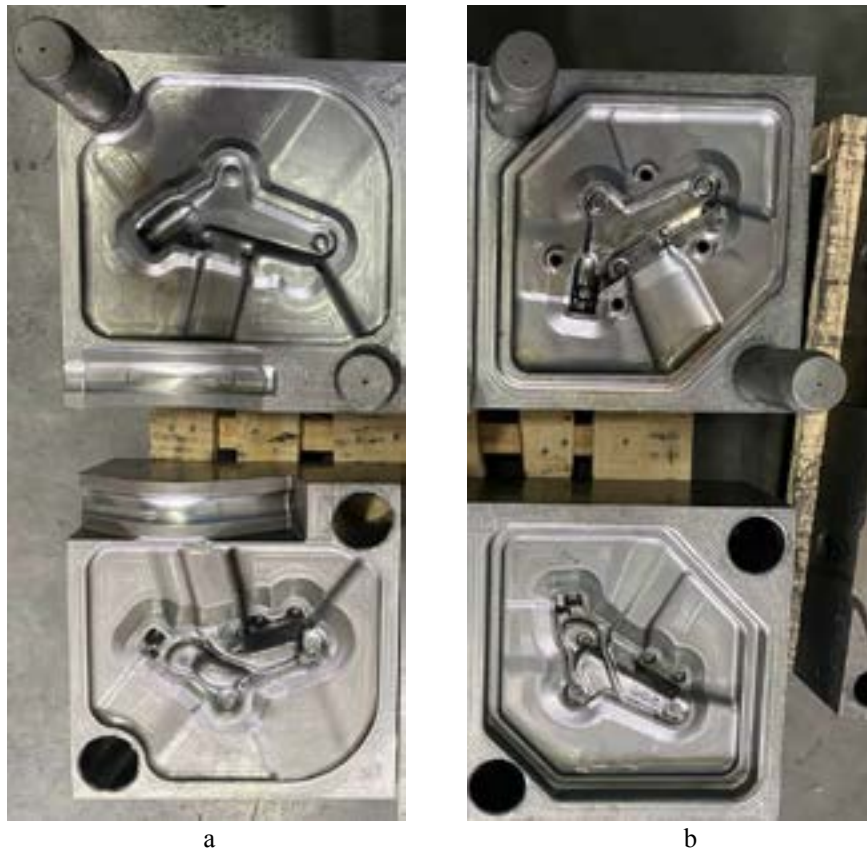


Fig. 6. Photo of the actual upper and bottom forming dies made using the QForm Direct die geometry export: preforming (a), finishing (b).

The trial forgings have shown the perfect quality of the finished part without any defect, as shown in Fig. 7 and the technology has been used for regular production.



Fig. 7. Photo of the actual preform part top and bottom views (a, b) and finished part top and bottom views (c, d) forged using proposed technology (no material flow defects).

FUTURE PERSPECTIVES:

The simulation-driven design has already demonstrated its potential to improve metal forming processes. However, there are several areas for further development and exploration. These include:

- Advancements in multi-objective optimization algorithms to consider multiple conflicting objectives simultaneously, such as maximizing productivity while minimizing material waste or energy consumption.
- Integration of artificial intelligence and machine learning techniques to enhance the automation and intelligence of the simulation-driven design process. This includes using predictive models to suggest optimal process parameters and tool designs based on historical data and simulations.
- Incorporation of advanced material models and characterization techniques to capture the complex behaviour of modern alloys, composites, and advanced materials. This will enable engineers to simulate and optimize forming processes for cutting-edge materials accurately.
- Integration of real-time monitoring and feedback systems into the simulation-driven design process. By capturing real-time data during production, engineers can validate and refine simulation models, ensuring their accuracy and reliability.

CONCLUSION:

The transition to a simulation-driven design process for metal forming technologies, primarily through the utilization of QForm Direct, represents a paradigm shift in the forging technology development. The software presents a transformative approach to process optimization, reducing dependency on trial-and-error methods and improving product quality, cost-effectiveness, and efficiency.

The presented case studies demonstrate the effectiveness of simulation-driven design, optimizing complex shape parts preform design, and enhancing the hot closed die forging process. These successful implementations testify to QForm Direct's potential in revolutionizing metal forming processes, highlighting the need for increased adoption and further research into its advanced applications. By embracing this technology, forges can expect not only enhanced productivity and product quality but also a profound advancement in the science of metal forming technology.

Furthermore, the future perspectives outlined in this paper highlight exciting directions for further research and development, paving the way for the continuous improvement and innovation of metal forming processes. By embracing simulation-driven design, industries can enhance their competitiveness, reduce development time and costs, and achieve higher levels of process efficiency and product quality in the ever-evolving landscape of metal forming.

REFERENCES

- [1] Feynman RP, Leighton RB, Sands M. The Feynman lectures on physics. Vol. II. Addison-Wesley; 1963.
- [2] N. Biba, A. Vlasov, D. Krivenko, A. Duzhev, S. Stebunov, Closed Die Forging Preform Shape Design Using Isothermal Surfaces Method, In Proceeding of ESAFORM 2020, ISBN: 978-1-7138-1028-5, pp. 268-273.
- [3] A. Vlasov, D. Krivenko, The use of a finite element thermal model for closed die forming preform shape design, Tula State University Proceedings, Technical science. 2019;5:96-12 [in Russian]
- [4] A. Vlasov, N. Biba, S. Stebunov, A. Duzhev, K. Kenjaliev The experience of QForm Direct software implementation for preform impressions design in hot closed die forging, Billet production in mechanical engineering. 2022; 20;11;501 -5

Rastreabilidade total no forjamento em matriz fechada

Marco importante alcançado: uma solução digital inovadora para forjamento em matriz fechada

Não é novidade para a indústria de forjamento os diversos softwares de controle e monitoramento aplicados nas prensas. Esses softwares já existem a várias décadas, no entanto, sua evolução vem acontecendo de maneira acentuada, com níveis de informações cada vez mais complexos, permitindo diversas novas aplicações. A solução mais recente no mercado é o módulo de rastreabilidade total.



A rastreabilidade total é uma solução única para o rastreamento digitalizado e inteligente de cada peça forjada, da qual as forjarias e seus clientes podem lucrar a longo prazo.

Medir, registrar e verificar a pegada de carbono de cada etapa de forjamento com um valor preciso de CO₂. Ao invés de grandes campanhas de recall, existe a capacidade de restringir um problema de qualidade a apenas algumas peças individuais e identificar a causa raiz. Identificar novos potenciais de otimização ao longo de todo o processo e cadeia produtiva. Esses são os principais benefícios de um software de controle completo com rastreabilidade total para linhas de forjamento em matriz fechada, uma solução única para o rastreamento digitalizado e inteligente de cada peça forjada, da qual as forjarias e seus clientes podem lucrar a longo prazo.

Os módulos de rastreabilidade total permitem elevar o desempenho do processo, a qualidade do produto, a ecologização e a otimização de custos a um nível completamente novo. É o elo que conecta tecnologia de medição, programação, engenharia e tecnologia de processo e controle para otimizar e permitir um melhor controle dos processos de forjamento.

Equipadas com tecnologia de sensores de última geração e câmeras de alta resolução, as máquinas serão, no futuro, capazes de tomar decisões inteligentes e independentes com base em dados e avaliações relevantes. Por exemplo, essa tecnologia pode ser usada para detectar trincas e prever desgaste, mostrando como isso se parece em aplicações do mundo real.

Com a função de detecção de trincas, por exemplo, uma trinca que está começando a se desenvolver na matriz é claramente identificada antes que possa afetar a qualidade das peças ou do processo. A capacidade de previsão de desgaste possui vantagens semelhantes.

Com os módulos de rastreabilidade total, as forjarias agora têm mais uma ferramenta poderosa à sua disposição. Os dados reais do processo são armazenados para cada forjamento em um registro de dados que é mantido para o produto durante todo o processo.

A inovação está na combinação

Os métodos de rastreamento anteriores não tiveram sucesso devido às condições ambientais do processo de forjamento. Um código de laser não é capaz de suportar o calor e as tensões mecânicas. Com isso, foi desenvolvido um novo processo que combina duas técnicas de marcação - marcação por pontos e marcação a laser. Esse processo está em aprovação de patenteamento.



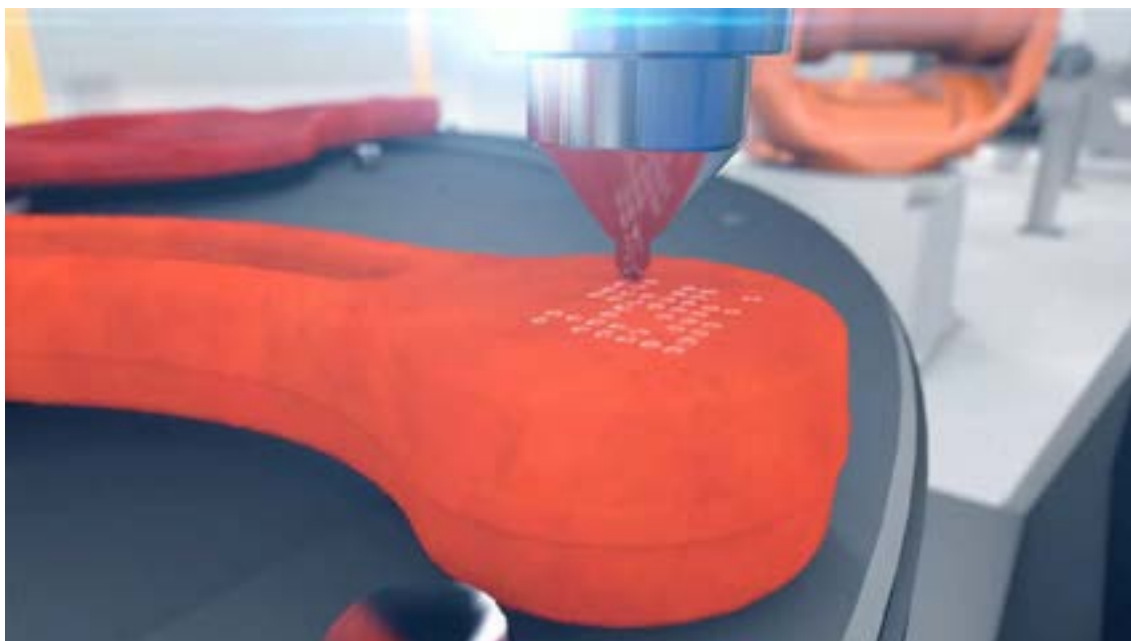
Sistema combinado de rastreamento. Fonte: SMS group

A técnica do processo de marcação por pontos abre a possibilidade de marcar peças forjadas a quente. Entre as etapas de forjamento, é gravado no tarugo um código utilizando máquina de marcação por pontos. Esse código é projetado, através de simulações de processo, para durar todas as etapas de processamento subsequentes.

O procedimento de marcação por punção é realizado diretamente a jusante da prensa de forjamento. Aqui, os robôs alimentam as peças de trabalho na estação de marcação em um processo totalmente automatizado. Um código data matriz padronizado (ECC200 por ISO/IEC 16022) é aplicado. O código de marcação de pontos é extremamente resiliente e tolerante a falhas. Mesmo que 25% da área da superfície do código seja perdida, ainda seria possível a leitura.

O código de marcação de pontos é aplicado em uma área que eventualmente é removida por usinagem, no momento da produção da superfície final da peça e o código a laser é aplicado imediatamente. Isso garante que cada peça de trabalho tenha seu próprio registro de dados totalmente rastreável.

Para garantir que as informações do código sejam retidas até a entrega do componente, o código de marcação por pontos é digitalizado imediatamente antes da usinagem e armazenado no registro de dados sequencial. Este registro de dados exclusivo também contém as informações do código a laser que é criado como uma etiqueta final usando um sistema de marcação a laser.



Processo de marcação de pontos em peças à quente. Fonte: SMS group

As montadoras de automóveis exigem um valor preciso de CO₂ para componentes forjados

A rastreabilidade total está abrindo perspectivas totalmente novas para empresas de forjamento. O melhor exemplo disso é a capacidade de obter um valor de CO₂ para cada peça forjada. As montadoras de automóveis precisam calcular a pegada de carbono de sua produção e de seus fornecedores, por imposições governamentais.

Ao implementar a rastreabilidade total, as forjarias não apenas cumprem um requisito básico estipulado pelas montadoras, mas também se beneficiam de possibilidades adicionais oferecidas pela solução. Um aspecto importante é que as empresas são capazes de identificar componentes com altas emissões de carbono.

Economia de custos e minimização significativa de recalls

Problemas de qualidade com um produto forjado podem ter uma ampla variedade de razões. Defeitos típicos de forjamento, como preenchimentos insuficientes, sobreposições ou entalhes, são muito difíceis de capturar e medir. Graças ao alto nível de garantia de qualidade nas forjarias, tais defeitos são extremamente raros. No entanto, quando ocorrem, os prejuízos econômicos são consideráveis.

Com a rastreabilidade total, as empresas de forjamento podem agora rastrear o defeito para ver se é um erro pontual ou uma falha sistêmica. Na maioria dos casos, o defeito pode ser reduzido a apenas algumas peças, causando danos significativamente menores. As montadoras também se beneficiam com isso, pois apenas os veículos nos quais as peças identificadas estão instaladas precisam ser especificamente recolhidos. O mesmo pode ser aplicado para os itens produzidos em larga escala para a indústria aeroespacial. Aqui, o histórico da peça pode ser lido e rastreado diretamente na aeronave usando o código laser.



Passaporte digital incluindo a pegada de CO₂ marcada por peça. Fonte: SMS group

Onde a garantia de qualidade e a otimização do processo começam

Os sensores integrados coletam continuamente os dados do processo, armazenando-os em um banco de dados encriptados na nuvem e os atribuem, desde o início do processo, a um código de peça único, que é aplicado à peça imediatamente após o forjamento, como explicado anteriormente.

Esse software de métrica é uma ferramenta eficaz para adquirir, armazenar e avaliar os dados da máquina em tempo real com os dados do módulo de rastreabilidade total. As avaliações podem ser facilmente criadas no navegador, adaptadas dinamicamente e acessadas de qualquer local do mundo.

Os dados reais obtidos do processo são armazenados em um banco de dados para cada peça forjada, tendo assim, a rastreabilidade total.



Os dados reais de processo por peça são gravados no banco de dados. Fonte: SMS group

Alta relação custo-benefício

Além das vantagens indiretas descritas, os módulos de rastreabilidade total também contribuem diretamente para melhorar a eficiência de custos. Por exemplo, componentes defeituosos podem ser identificados e removidos rápida e precocemente, antes que grande parte do valor agregado tenha ido para a peça. Os processos podem ser estabilizados e a eficácia geral do equipamento (OEE) aprimorada por meio de correções automáticas durante a fabricação. Desta forma, os estoques de segurança podem ser reduzidos ou eliminados completamente. Em conjunto com sistemas ópticos que executam uma última verificação, o processo de inspeção final, que até agora era muito trabalhoso, pode ser amplamente automatizado.

Um must-have: para retrofits e novos equipamentos

Em termos de equipamento e tecnologia de controle, o novo sistema está sendo considerado como um padrão para linhas novas, no entanto, também pode ser integrado a linhas existentes.

Definindo o curso hoje para o mundo digital de amanhã

A rastreabilidade total é a ligação entre todos os dados de controle e monitoramento já presentes nas linhas de forjamento. Essa ligação era o elo faltante para começar o verdadeiro *big data* das linhas de forjamento. Com isso, a indústria de forjamento terá em suas mãos todos os recursos necessários para revolucionar sua produção, conforme o que vem acontecendo com os outros ramos industriais, exatamente com a revolução 4.0. Esses serão os moldes para permitir uma produção eficiente, otimizada e com ecologicamente correta.



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil

26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de

Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDR

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming

Conference / 9th BrDDR Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis

12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

Análise do processo de Extrusão Direta de Tubos de aço SAE 1010

Eng. Mec. Wagner Soares ⁽¹⁾
Prof. Dr. Ing. Lirio Schaeffer ⁽²⁾

⁽¹⁾ Mestrando, PPGE3M – UFRGS, Brasil wsilveirasoares@gmail.com ,

⁽²⁾ Prof. Dr. Ing. PPGE3M – UFRGS, Brasil schaefer@ufrgs.br

RESUMO

O conhecimento da redução máxima de extrusão direta é essencial para determinar a capacidade de um material de suportar deformações sem ocorrência de defeitos estruturais durante o processo. No caso específico de tubos de aço SAE1010, a extrusão direta desempenha um papel crucial na melhoria da resistência mecânica do material, devido ao encruamento gerado no processo, evitando assim a necessidade de tratamento térmico subsequente. Este estudo teve como objetivo prever com precisão a redução máxima de diâmetro externo na extrusão direta para tubos de aço SAE1010 e avaliar o comportamento do aumento de dureza devido o encruamento após o processo. Por meio de ensaios experimentais e simulações computacionais utilizando o software QForm, foram estabelecidos parâmetros e metodologias para a realização bem-sucedida de extrusão direta a frio em tubos de aço SAE1010. Os resultados deste estudo contribuem para a compreensão do processo de extrusão direta a frio, fornecendo informações valiosas para a indústria, permitindo a produção de componentes mais resistentes de forma eficiente e econômica.

Palavras-chave – Extrusão Direta, Tubos, Ensaios, Simulação Computacional, Encruamento, Dureza

ABSTRACT

Knowledge of the maximum direct extrusion reduction is essential to determine the ability of a material to withstand deformations without the occurrence of structural defects during the process. In the specific case of SAE1010 steel tubes, direct extrusion plays a crucial role in improving the mechanical

resistance of the material, due to the hardening generated in the process, thus avoiding the need for subsequent heat treatment. This study aimed to accurately predict the maximum reduction in external diameter in direct extrusion for SAE1010 steel tubes and evaluate the behavior of hardness increase due to hardening after the process. Through experimental tests and computer simulations using QForm software, parameters and methodologies were established for the successful performance of direct cold extrusion in SAE1010 steel tubes. The results of this study contribute to the understanding of the direct cold extrusion process, providing valuable information for the industry, allowing the production of more resistant components efficiently and economically.

Key words — Direct Extrusion, Tubes, Tests, Computer Simulation, Hardening, Hardness

1. INTRODUÇÃO

Historicamente, a conformação mecânica tem sido um dos processos de fabricação mais amplamente utilizados e estabelecidos, capaz de produzir componentes com alta resistência mecânica e qualidade, abrangendo uma ampla gama de tamanhos e complexidades. Essa técnica inclui desde operações simples, como prensagem e extrusão, até a produção de peças com geometrias complexas que seriam altamente desafiadoras de serem fabricadas por outros métodos.

À medida que a indústria metalúrgica busca soluções eficientes e economicamente viáveis para produzir componentes metálicos com geometrias cada vez mais complexas, a extrusão direta surge como uma técnica promissora. Ela oferece a capacidade de fabricar peças com precisão dimensional excepcional e integridade estrutural.

No contexto deste estudo, a aplicação da extrusão direta em tubos de aço SAE 1010 se destaca como uma área que requer uma investigação aprofundada. O processo de extrusão, em sua essência, envolve a passagem controlada e forçada de material através de uma matriz, conferindo à peça a forma desejada, resultando em propriedades mecânicas superiores. A extrusão pode ser subdividida em extrusão direta e extrusão indireta, com a variável definidora sendo o sentido do fluxo do material.

Este estudo propôs-se a realizar ensaios mecânicos em tubos de aço SAE 1010 antes do processo de extrusão, a fim de compreender as propriedades do material em estudo. Além disso, empregou simulações computacionais com o software QForm para variar as medidas de redução do diâmetro externo dos tubos durante o processo de extrusão e definir as características do processo. Posteriormente, ensaios práticos de extrusão foram realizados com as mesmas configurações e medidas, permitindo uma análise comparativa de resultados. Por fim, ensaios de dureza foram conduzidos antes e após cada estágio do processo de extrusão, a fim de avaliar as mudanças nas propriedades mecânicas do material.

Este estudo visa preencher uma lacuna no entendimento da aplicação da extrusão direta em tubos de aço SAE 1010, oferecendo percepções valiosas para a indústria e contribuindo para a produção eficiente e econômica de componentes metálicos de alta qualidade e complexidade.

2 MATERIAL

2.1 CARACTERÍSTICAS DA MATÉRIA PRIMA

A caracterização do material empenha um papel fundamental na engenharia, fornecendo informações essenciais para compreender o comportamento e as propriedades dos materiais utilizados para o estudo. O material utilizado é o aço SAE 1010, este material é uma liga de Ferro + Carbono com aproximadamente 0,10% de carbono e algumas impurezas. O aço SAE 1010 é muito fácil de ser encontrado no mercado, pois, é muito utilizado na indústria pelo motivo de ter ótimas características mecânicas, algumas são: boa conformabilidade e soldabilidade, por isso, sua grande gama na utilização em meios estruturais como fixadores, barras de apoio e etc.

A matéria prima é fornecida através de *Tubos Trefilados com Costura Removida* com as dimensões de diâmetro externo (D_o) 21,8mm, diâmetro interno (d_o) 17,10mm e comprimento (L_o) 3000mm. Os

tubos são obtidos pelo processo de Trefilação a frio, na qual é bastante utilizado para fins mecânicos onde se requer exatidão dimensional e ótimo acabamento superficial. A norma para *Tubos Trefilados com Costura Removida* é DIN EN 10305-2, onde substitui a norma antiga DIN 2393. O objetivo das normas é garantir a qualidade do produto, estabelecendo padrões e critérios para a aceitação do produto. Segue as tolerâncias dimensionais da matéria prima estabelecidas pela norma DIN EN 10305-2. (Tabela 1)

Tabela 1: Dimensões da Matéria Prima - Norma DIN EN 10305-2

Externo (mm)		Interno (mm)		Espessura (mm)
Diâmetro	Tolerância	Diâmetro	Tolerância	
18,00	± 0,08	11,00 à 17,00	± 0,08 à ± 0,15	0,50 à 3,50
20,00 à 22,00	± 0,08	12,00 à 21,00	+ 0,08 à + 0,15	0,50 à 4,00
25,00 à 28,00	± 0,08	16,00 à 27,00	± 0,08 à ± 0,15	0,50 à 4,50

Segue a composição química do aço conforme o Certificado de Qualidade. (Tabela 2)

Tabela 2: Composição Química - conforme Certificado de Qualidade

Composição Química (%)									
C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	Al
0,13	0,51	0,014	0,008	0,019	0,005	0,021	0,001	0,006	0,038

2.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE A RESISTÊNCIA A DEFORMAÇÃO (kw)

Visando determinar as curvas de Resistência a Deformação (kW) específicas para o material em estudo, foi realizado ensaios de compressão utilizando as seguintes dimensões: diâmetro externo (D_o) 21,80 mm, diâmetro interno (d_o) 17,10 mm e comprimento (l_o) 33 mm, (Figura 1). Os ensaios foram conduzidos utilizando uma máquina universal de ensaios da marca EMIC com capacidade de 10 kN e foram realizados 3 ensaios para cada curva e após retirado a curva média.

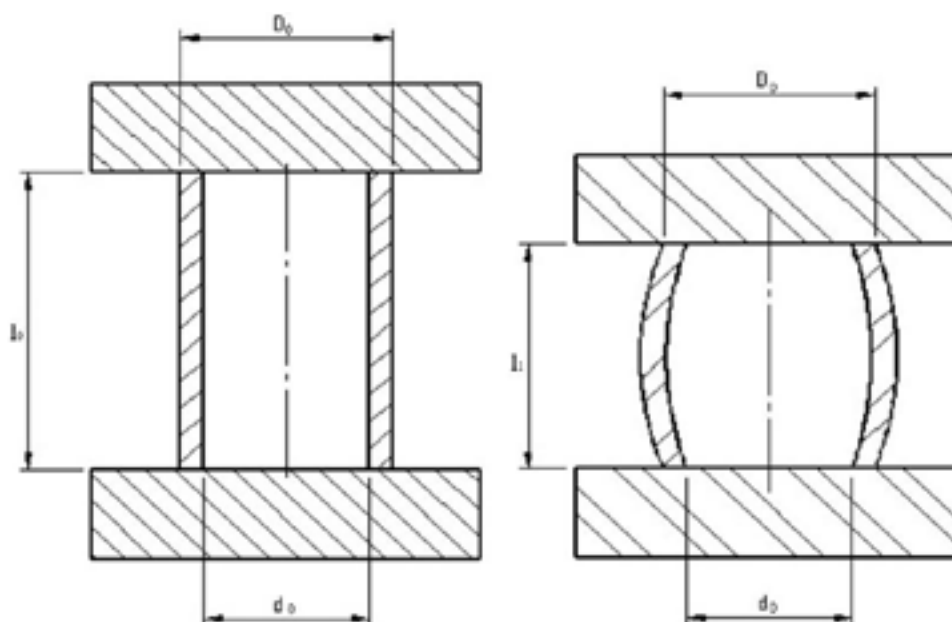


Figura 1: Dimensões usadas no ensaio de compressão de tubos

A Figura 2 mostra os resultados físicos dos ensaios de compressão com tubos.



Figura 2: Ensaio de compressão em diferentes etapas

Para obter a curva da Resistência a Deformação (k_w) X Deformação Verdadeira (φ), foi concentrado na região plástica da curva Tensão (σ) x Deformação verdadeira (φ) foi utilizado as equações 1 e 2.

$$k_w = \frac{F_i}{A_i}$$

Equação 1

$$\varphi = \ln \frac{l_i}{l_0}$$

Equação 2

Onde:

k_w : Resistência a deformação (Mpa) ;

F_i : Força instantânea (N) ;

A_i : Área instantânea (mm) ;

φ : Deformação verdadeira ;

l_i : Comprimento instantâneo (mm) ;

l_0 : Comprimento inicial (mm)

Conforme observado na (Figura 3), foi traçado a curva Tensão (σ) X Deformação Verdadeira (φ).

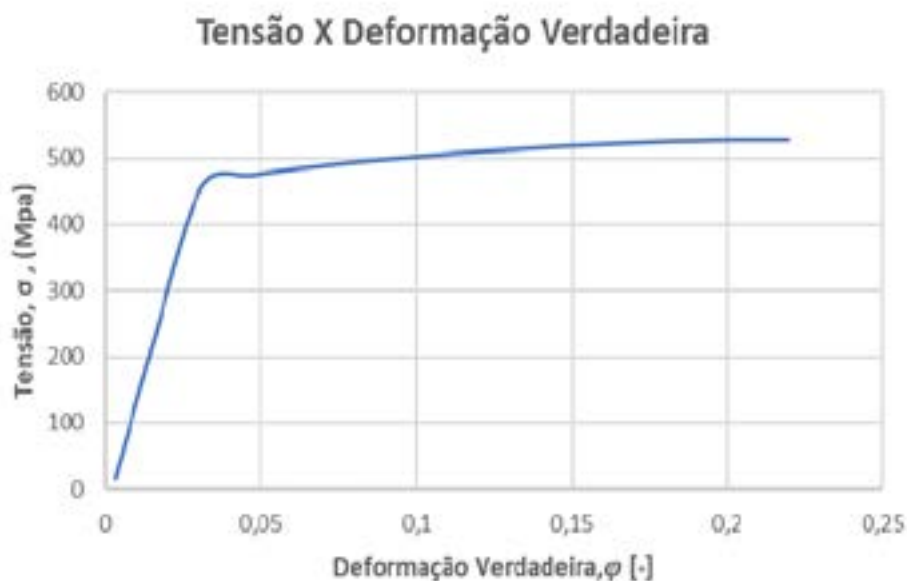


Figura 3: Deformação Verdadeira dos tubos de aço SAE 1010

A curva de resistência a deformação (k_w) foi desenvolvida a partir da região plástica da curva Tensão (σ) x Deformação verdadeira (ϕ). A zona plástica do material inicia-se após o Limite de escoamento (k_f) até a Tensão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x.}$) do material. A partir destes dados foi possível criar a curva de Resistência a deformação (k_w) do material. (Figura 4)



Figura 4: Curva de Resistência a Deformação (k_w)

Com o objetivo de comparar a curva de Resistência à Deformação (k_w) com uma Curva de Escoamento (k_f), utilizou-se a Curva de Escoamento do aço DIN Ck15 em condições de temperatura ambiente, obtida por meio de um ensaio de Compressão Uniaxial conduzido por Heinz Tschaetsch (Figura 5). O aço DIN Ck15 é amplamente empregado em componentes mecânicos e possui uma composição química similar à do aço SAE1010.

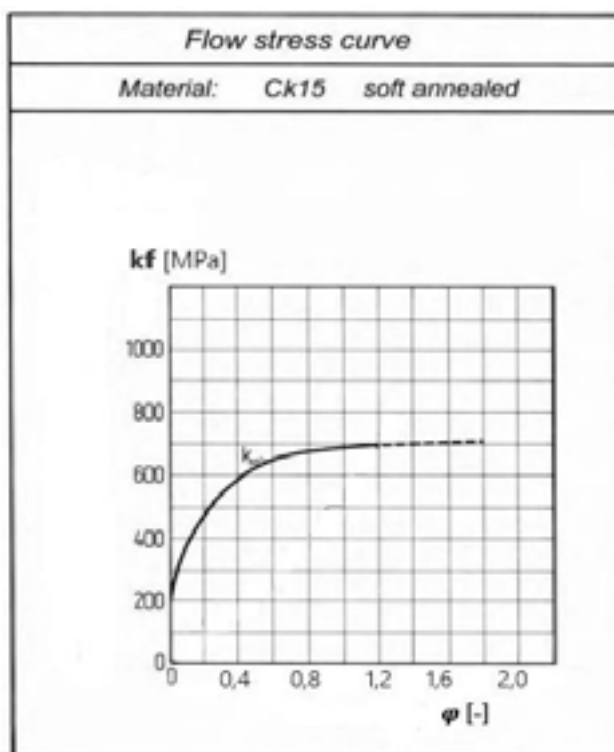


Figura 5: Curva de Escoamento (k_f) a frio do aço DIN Ck15 - Metal Forming Practise; Heinz Tschaetsch, 2005

3. ASPECTOS GEOMÉTRICOS DO PROCESSO DE EXTRUSÃO DE TUBOS

As dimensões iniciais dos tubos são apresentadas a seguir: (Tabela 3) , (Figura 6):

Tabela 3: Dados do tubo para ensaios

Diâmetro Externo D_o (mm)	Diâmetro Interno d_o (mm)	Comprimento l_o (mm)
21,80	17,10	200

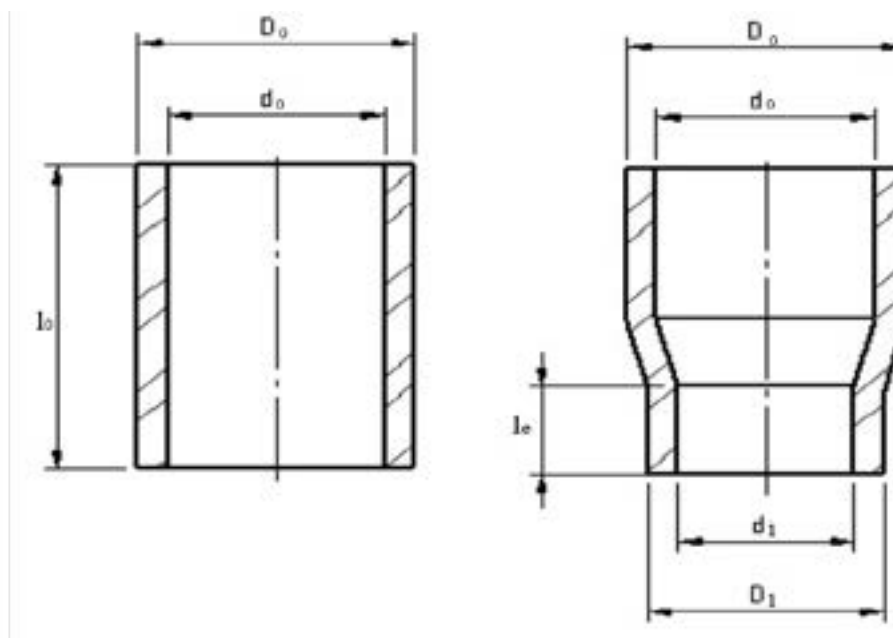


Figura 6: Imagem esquemática da extrusão direta do tubo

A escolha cuidadosa dos diâmetros é essencial para garantir a qualidade nas etapas posteriores. Logo, para determinação dos diâmetros externos de redução foi adotado uma relação entre o diâmetro externo do tubo e porcentagens de redução do diâmetro externo, iniciando com 15% de redução do diâmetro externo e aumentando conseqüentemente de 5% até chegar em 50% de redução do diâmetro externo. Todos os demais cálculos foram a partir destes diâmetros determinados. Para todos os ensaios, o comprimento de extrusão (l_e) foi de 100mm.

Os devidos diâmetros foram calculados através da seguinte maneira:

$$D_1 = \frac{D_o \times (100 - y)}{100} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

D_1 : Diâmetro da redução (mm);

D_o : Diâmetro inicial (mm);

y : (ϵD_1) Deformação Relativa do D_1 (%)

Através da (Equação 3) foi montado a (Tabela 4) com os dados de Deformação Relativa do D_1 .

Tabela 4: Deformação Relativa do D_1 (ϵD_1)

DEFORMAÇÃO RELATIVA DO D_1 (%)							
15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%
18,53mm	17,44mm	16,35mm	15,26mm	14,17mm	13,08mm	11,99mm	10,90mm

4. SIMULAÇÃO DO PROCESSO

4.1 ANÁLISES DO PROCESSO DE EXTRUSÃO

A análise por meio do Método dos Elementos Finitos envolveu a realização de simulações utilizando o software QForm. Nesses estudos, foi obtido o perfil das peças extrudadas com base nas geometrias das matrizes, utilizando os diâmetros previamente estabelecidos. Inicialmente, iniciou-se com uma redução de diâmetro externo de 15% e, subsequentemente, incrementado em 5% até alcançar o ponto de flambagem do material.

Essas simulações foram conduzidas considerando um modelo elastoplástico, o qual permitiu simular com fidelidade o processo de extrusão direta a frio dos tubos de aço SAE1010 em temperatura ambiente. Para simulação computacional foi plotado a Curva de Escoamento disponível na biblioteca do software, para auxiliar na análise dos resultados e na compreensão do comportamento do material ao longo do processo de extrusão.

Segue dados do material e processo: (Tabela 5) ; (Figura 7) e (Tabela 6)

Tabela 5: Dados do material para simulação - QFORM

DADOS DO MATERIAL	
MATERIAL	Aço SAE 1010
DENSIDADE [ρ]	7837 kg/m ³
CONDUTIVIDADE TÉRMICA [λ]	1.11914e-5 – BASE 20°
CALOR ESPECÍFICO [c]	491 J/(kg.K)
MÓDULO DE YOUNG [E]	210000 Mpa

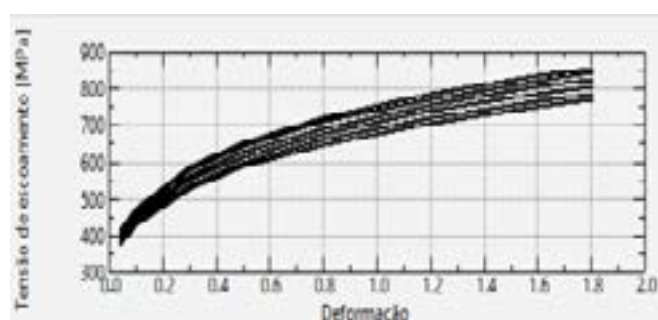


Figura 7: Curva de escoamento aço SAE1010 - QFORM

Tabela 6: Dados do processo -QFORM

DADOS DO PROCESSO	
TIPO DE MALHA	ADAPTATIVA
LUBRIFICANTE [μ]	SABÃO LUBRIFICANTE (0,05)
TEMPERATURA [°C]	20°
CURSO [Le]	100 mm

Inicialmente, foi conduzido uma análise do comportamento de extrusão direta dos tubos com base nos diâmetros previamente determinados. A simulação teve início com uma redução de diâmetro externo de 15%, e incrementado essa redução em 5% em cada etapa, observando o comportamento do tubo.

Observado que o tubo conseguiu passar pelo processo de extrusão com sucesso quando atingido uma redução de 20%. No entanto, ao aumentar a redução para 25%, o tubo entrou em um fenômeno de flambagem, indicando que a força de extrusão ultrapassou a força crítica de flambagem de Euler. Como resultado, foi decidido realizar uma simulação intermediária com uma redução de diâmetro externo de 22,5% para analisar o comportamento nesse nível de redução. Foi descoberto que, com uma redução de 22,5%, o processo de extrusão do tubo pôde ser realizado com sucesso. Segue (Figura 8)

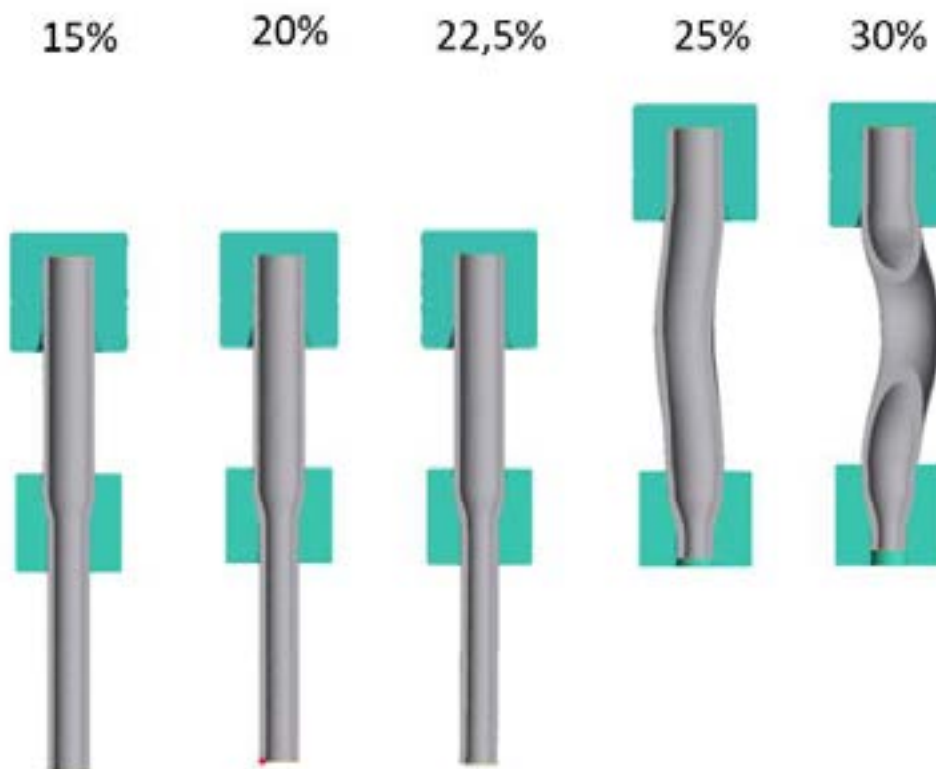


Figura (8): Simulação computacional de extrusão dos tubos - QFORM

4.2 FORÇA DE EXTRUSÃO

Após realizar as análises de extrusão do material foi analisado a força necessária para a extrusão direta do tubo de aço SAE 1010. A imagem a seguir (Figura 9), apresenta as forças de extrusão através de um gráfico Força x Deslocamento, onde os valores de Força (Ton.) estão no eixo Z e os valores de Deslocamento (mm) estão no eixo X.

Na redução de 15 % de diâmetro externo, onde o tubo reduziu o diâmetro externo de 21,80mm para 18,53mm, foi necessário 2,95 Ton, nota-se que a força foi constante e não teve muita instabilidade ao longo da extrusão.

Na redução de 20 % de diâmetro externo, onde o tubo reduziu o diâmetro externo de 21,80mm para 17,44 mm, foi necessário 4,05 Ton. Confirma-se via simulação que ao diminuir a redução de extrusão aumenta-se a força necessária para executar o processo, logo teve aumento de aprox. 1 Ton. em relação a redução de 15% de diâmetro externo.

Na redução de 22,5 % de diâmetro externo, onde o tubo reduziu o diâmetro externo de 21,80mm para 16,90mm, foi necessário 4,7 Ton. Notou-se comportamento uniforme e semelhante às simulações anteriores.

Na redução de 25 % de diâmetro externo, foi onde aconteceu o fenômeno de flambagem no tubo. Nota-se que após o Martelo da extrusora deslocar 21,47mm (conseqüentemente o tubo extrudou 21,47mm), resultou em uma força de extrusão de 6,07 Ton. , logo ao invés de completar a extrusão do tubo houve deformação não uniforme gerando a flambagem.

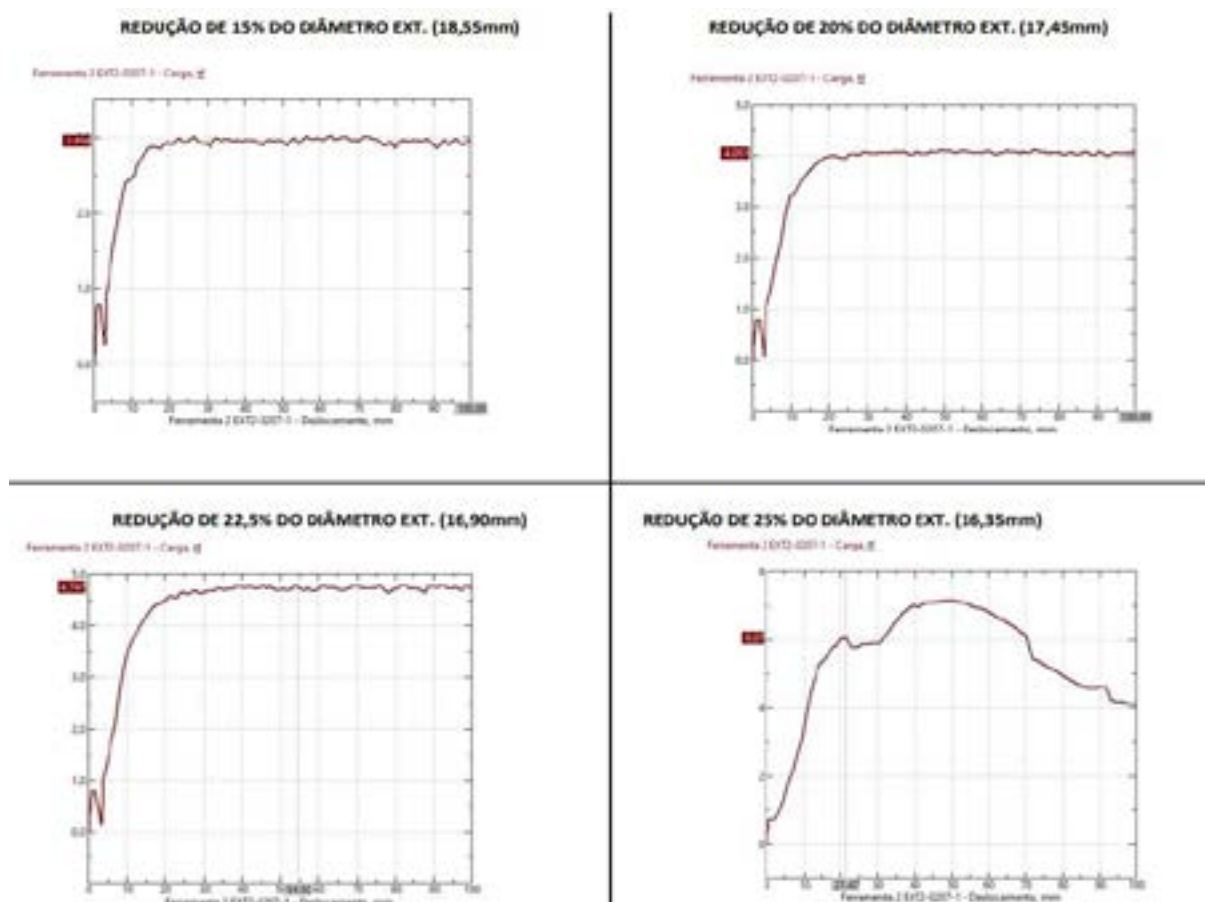


Figura 9: Esforços de Extrusão

A seguir, a imagem (Figura 10) apresenta de forma detalhada o momento em que ocorre a flambagem na redução de 25% de redução de diâmetro externo. Na região é possível analisar através da demarcação em vermelho o momento em que ocorre a deformação não uniforme durante a extrusão, interessante ressaltar no deslocamento do martelo de 21,47mm, ocorre a deformação não uniforme, conseqüentemente aumentando a força de extrusão para 6,07 Ton. Contudo, ocorre a flambagem logo após esse momento.

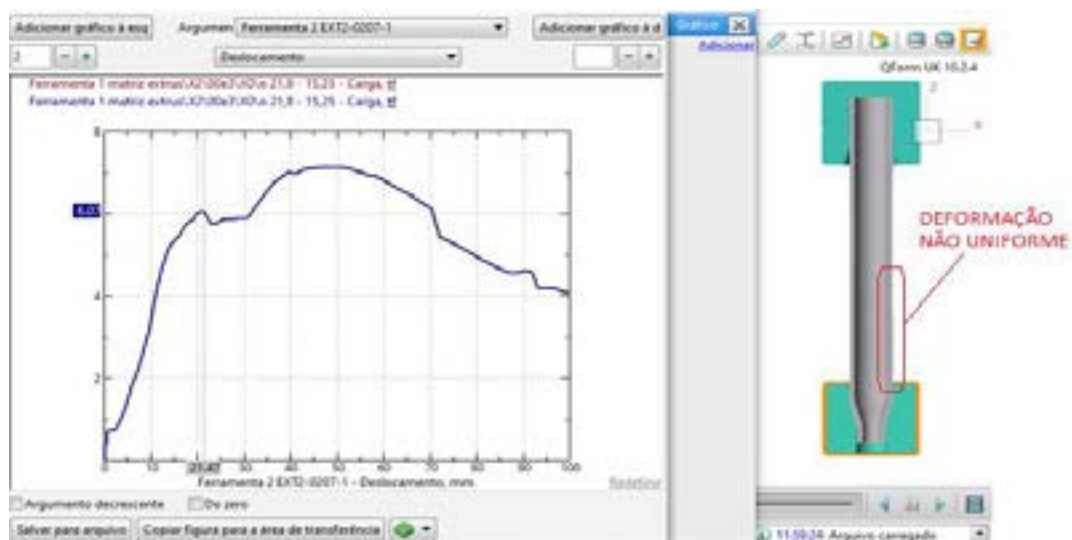


Figura 10: Momento da flambagem

4.3 ESFORÇOS NA FERRAMENTA DE EXTRUSÃO

Para garantir a integridade da ferramenta, foram realizadas as simulações computacionais da ferramenta em todos os casos, a fim de garantir que a ferramenta não ultrapassasse a zona de deformação plástica. Foi provado através de simulação que a ferramenta sofre a maior tensão cisalhante na situação de redução de 25% de redução de diâmetro externo, ou seja, no momento em que ocorre a flambagem.

Através da imagem (Figura 11) gerada pelo software QFORM, é possível visualizar que no instante de maior tensão, são geradas apenas tensões compressivas na ferramenta, a tensão na região do canal de calibração da ferramenta é de -268,80 MPa. Na imagem de simulação computacional, o gradiente de cores na Ferramenta representa os pontos com as tensões localizadas

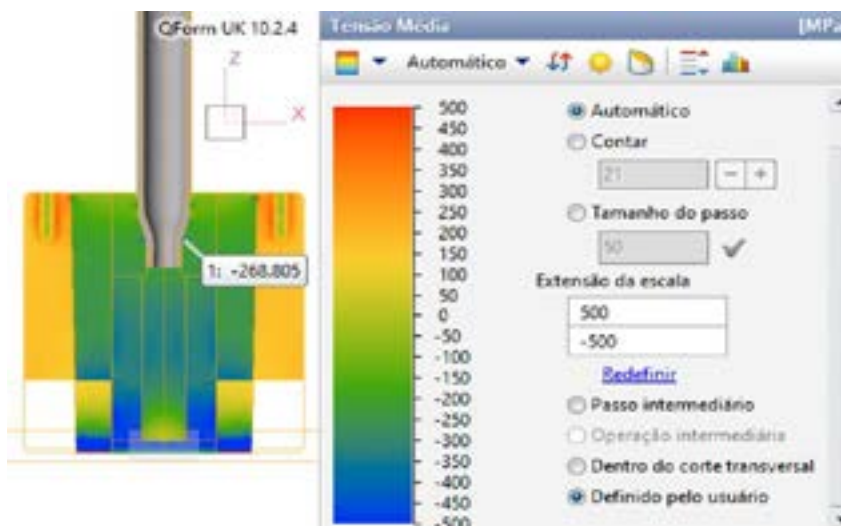


Figura 11: Tensões na Ferramenta

Após a análise das tensões na ferramenta de extrusão, foi conduzida uma avaliação da sua vida útil. Os resultados dessa análise indicaram uma vida útil excepcionalmente extensa para a ferramenta. De fato, essa vida útil pode ser considerada praticamente infinita, uma vez que a ferramenta demonstrou capacidade para suportar aproximadamente 11.700.000.000 ciclos antes de atingir o ponto de ruptura. (Figura 12)

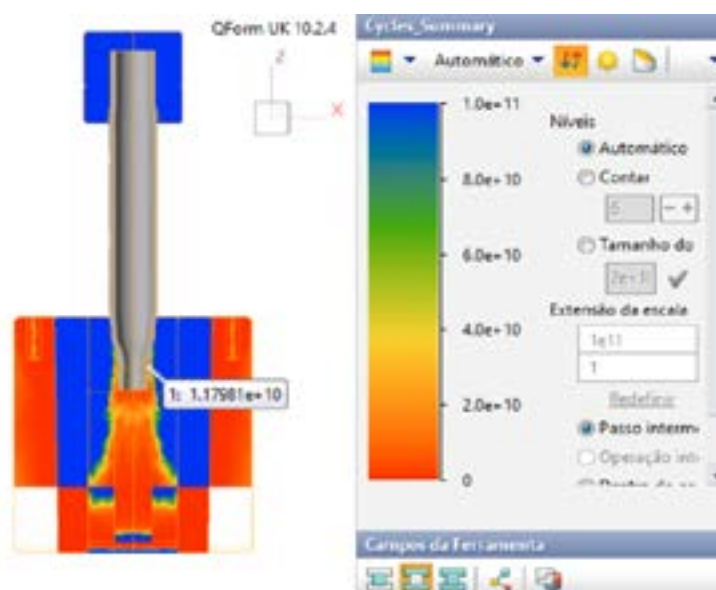


Figura 12: Vida útil da ferramenta de extrusão.

5 ANÁLISE EXPERIMENTAL

5.1 ASPECTOS DE FLAMBAGEM

Para a realização dos ensaios práticos de extrusão, os corpos de prova passaram por um processo de preparação que incluiu um tratamento superficial com fosfato, seguido da aplicação de um sabão lubrificante especialmente formulado para forjamento a frio. Ao longo de todos os ensaios, o comprimento da extrusão foi fixado em 100 mm, garantindo uma consistência nas condições de teste. Para aumentar a confiabilidade dos resultados, cada ensaio foi repetido utilizando três corpos de prova distintos. Essa abordagem, de empregar múltiplos corpos de prova, foi adotada com o intuito de minimizar variações aleatórias e proporcionar uma avaliação mais robusta e precisa das respostas do material durante o processo de extrusão.

Através do ensaio prático, foi possível observar que o tubo conseguiu passar pelo processo de extrusão sem apresentar flambagem com reduções de diâmetro de 15%, 20% e 25%. No entanto, a partir de uma redução de 30%, ocorreu o fenômeno de flambagem nos tubos. Vale destacar que com uma redução de 30%, o tubo foi capaz de extrudar aproximadamente 40 mm antes de entrar em flambagem. Entretanto, ao alcançar uma redução de 35% no diâmetro externo, o tubo flambou sem conseguir extrudar nenhum comprimento adicional. Isso ocorreu devido ao material travar no ângulo de entrada da ferramenta, impedindo-o de avançar até o canal de calibração de extrusão. Segue (Figura 13)



Figura 13: (A) 15%; (B) 20%; (C) 25%; (D) 30%; (E) 35%.

5.2 DUREZA

Com o objetivo de analisar o comportamento do Tubo de aço SAE 1010 após o processo de Extrusão Direta, foi realizado ensaio de Dureza em 3 amostras de cada peça ensaiada e também do tubo antes de sofrer o encruamento proveniente do processo, foi definido em realizar o ensaio de Dureza HRB pelo motivo do material ser aço de baixo teor de carbono, onde, tem escala de dureza de 20HRB até 100 HRB. Foi utilizado um Durômetro de bancada analógico da marca Heckert, na escala Rockwell HRB, utilizado penetrador esférico de 1/16" (1,5875mm), pré carga de 10kgf e carga máxima de 100kgf, conforme (Figura 14).



Figura 14: Medições de dureza

Após a realização dos ensaios, percebeu-se que houve aumento de aproximadamente 10 pontos de dureza devido ao encruamento proveniente do processo de Extrusão Direta, conforme (Tabela 7) e (Figura 15)

Tabela 7: Medidas de Dureza

AMOSTRA	DUREZA 1 (HRB)	DUREZA 2 (HRB)	DUREZA 3 (HRB)	MÉDIA DE DUREZA (HRB)
AMOSTRA 1 (0% REDUÇÃO)	74	73	75	74
AMOSTRA 2 (15% DE REDUÇÃO)	76	80	79	78,3
AMOSTRA 3 (20% DE REDUÇÃO)	83	82	83	82,7
AMOSTRA 4 (25% DE REDUÇÃO)	83	84	83	83,3
AMOSTRA 5 (30% DE REDUÇÃO)	84	83	85	84



Figura 15: Aumento de Dureza após extrusão.

4. CONCLUSÕES

Após investigarmos uma série de parâmetros por meio de simulações e ensaios práticos de extrusão, chegamos a várias conclusões significativas neste estudo.

Uma descoberta de grande relevância é a comprovação de que o processo de extrusão direta tem a capacidade de aumentar a dureza e, conseqüentemente, a resistência mecânica dos tubos de aço SAE 1010. Em determinadas aplicações, essa melhoria nas propriedades mecânicas pode ser alcançada sem a necessidade de realizar tratamentos térmicos adicionais para endurecimento.

Outro ponto crucial a destacar é a influência da porcentagem de redução no processo. Por meio de simulações, pudemos observar que a flambagem ocorre com uma redução de 25%, enquanto que com 22,5% de redução, a flambagem foi evitada. Este resultado foi confirmado nos ensaios práticos, onde se verificou que é possível realizar o processo de extrusão sem o fenômeno de flambagem com uma redução de 25%. Isso implica uma diferença de aproximadamente 2,5% na porcentagem de redução.

Portanto, com base nas evidências obtidas, é possível estabelecer com segurança o limite de extrusão para os tubos de aço SAE 1010 em torno de 22,5%, o que resulta em um aumento de aproximadamente 10 pontos na escala HRB de dureza. Essas descobertas representam avanços significativos na produção de componentes metálicos, oferecendo uma alternativa viável e econômica para melhorar suas propriedades mecânicas por meio da extrusão direta.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a toda equipe e colegas do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da Universidade do Rio Grande do Sul e a empresa Viemar Automotiva, pela realização dos ensaios e simulação computacional.

REFERÊNCIAS

- [1] SCHAEFFER, L. (2001). Forjamento - Introdução ao Processo. Ed: Imprensa Livre, Porto Alegre, RS, Brasil.

- [2] DIETER, G. E. (1981). Metalurgia Mecânica. Ed: Guanabara Dois, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

- [3] BILLIGMANN, J.; FELDMANN, H. D.. Estampado y Prensado à Máquina. 2^a edição, Editora Reverté, Espanha, 1979

- [4] OBTENÇÃO DA CURVA DE ESCOAMENTO A FRIO PARA O AÇO AISI 4140 ATRAVÉS DO ENSAIO DE COMPRESSÃO - Alex Sandro Matos de Oliveira, Paulo Ricardo Böesch Júnior, Diego Abich Rodrigues – 67° congresso ABM internacional congress

- [5] Heinz Tschaetsch (2005). METAL FORMING PRACTISE: Processes, Machines, Tools - 2005TH Edição EBOOK

Análise do Forjamento de Biela de Alta Resistência do Aço Microligado ao Vanádio 30MnVS6

Resumo:

Bielas de alto desempenho são componentes de aço forjado, com alta resistência mecânica, resistência a fadiga e integridade estrutural. Neste trabalho, uma rota de processamento termomecânico é proposta para alcançar estas propriedades e reduzir os custos de produção. O aço microligado ao vanádio 30MnVS6 é austenitizado, forjado a baixa velocidade e resfriado ao ar. Após o forjamento, o material é submetido a avaliação microestrutural e a testes de dureza e tração uniaxial. A análise de processo mostra que a cinética do forjamento induz deformações a temperaturas inferiores a temperatura de recristalização. Consequentemente, a estrutura austenítica prévia torna-se fina e deformada. O resultado é uma microestrutura final extremamente refinada. As propriedades mecânicas obtidas demonstram que a rota proposta possui potencial para aumentar a eficiência e o desempenho dos motores de combustão interna, sem a necessidade de tratamentos térmicos dispendiosos ou materiais de custo elevado.

Palavras-chave:

Forjamento; Biela; Alta Resistência.

Título em inglês

Forging of High Strength Connecting Rod of Vanadium Microalloyed Steel Analysis

Andre Rosiak (CBCM); Luana de Lucca de Costa, Thomas Gomes dos Santos, Diego Pacheco Wermuth e Lirio Schaeffer (UFRGS)



42° SENAFOR

28ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil

26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis

12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

APPLIED NUMERICAL AND ANALYTICAL ANALYSIS FOR THE OPTIMIZATION OF THE SCREW COLD FORGING PROCESS

Édipo de Almeida de Freitas ⁽¹⁾

Thomas Gomes dos Santos ⁽²⁾

Diego Pacheco Wermuth ⁽³⁾

André Rosiak ⁽⁴⁾

Lirio Schaeffer ⁽⁵⁾

ABSTRACT

This article addresses the optimization of the manufacturing process for a flanged hexagonal head roofing screw. Through analytical analyses and numerical simulations, a new direct extrusion step was proposed, resulting in a 7% reduction in raw material consumption. The distribution of stress and deformation along the piece was evaluated, highlighting the importance of tool design. The precision of the analyses was confirmed by a 3% agreement between analytical calculations and numerical simulations. This approach demonstrates the effectiveness of combining methods for industrial process optimization, aiming for sustainability and competitiveness.

Keywords: Analytical analyses, finite element analysis, direct extrusion.

1. INTRODUÇÃO

O mercado global de parafusos foi avaliado em US\$ 43,76 bilhões em 2022 e, segundo projeções, deve atingir cerca de US\$ 68,62 bilhões até 2032 [1]. Os fabricantes de fixadores utilizam tecnologias e métodos de manufatura semelhantes para fabricar parafusos, gerando um baixo nível de diferenciação do produto. Além disso, os parafusos são utilizados e vendidos como produtos padrão com diferenciação limitada, o que resulta em maior concorrência no mercado. Conseqüentemente, o preço do produto é um dos principais fatores que influenciam a escolha dos fornecedores pelos consumidores.

Neste contexto, uma alternativa altamente eficaz de reduzir custos de produção e, conseqüentemente, tornar-se mais competitivo é investir em engenharia com o objetivo de otimizar o projeto do processo de fabricação. Desta forma, é possível ampliar a produtividade, reduzir perdas e tornar os consumos de energia e matéria-prima mais eficientes.

Para um projeto de produto ideal, um conhecimento abrangente do processo de fabricação é essencial para a melhor utilização das vantagens relacionadas ao processo e para garantir as características ideais do produto [2]. No desenvolvimento de um produto forjado, as condições de processamento devem ser definidas com precisão durante a etapa de projeto para evitar custos adicionais após o início da produção. O conhecimento do número de estágios, da força de forjamento e da distribuição de tensão e deformação é fundamental para a fabricação bem sucedida das ferramentas. Portanto, é necessário selecionar um método eficaz para executar o projeto das ferramentas de forma ágil e otimizada.

Nas últimas décadas, devido aos avanços tecnológicos da computação, o emprego da simulação numérica possibilitou desenvolvimentos significativos no projeto de processos de conformação mecânica. Vários softwares comerciais baseados no Método dos Elementos Finitos (*Finite Element Method - FEM*) têm sido desenvolvidos para a análise de conformação mecânica possibilitando a resolução de problemas tradicionais no desenvolvimento de novas peças forjadas. Atualmente, a experiência do projetista é assistida pela análise numérica para desenvolver novos produtos. Dessa forma, experimentos e testes, que consomem tempo e dinheiro, podem ser minimizados.

Outro método de análise consolidado utiliza cálculos analíticos. Esta abordagem é extremamente útil para estimativas rápidas e análises mais simples, sendo usada com sucesso para prever forças e tensões de forjamento com precisão de engenharia

aceitável. Além disso, os cálculos ajudam o projetista a entender os efeitos de vários parâmetros de forjamento [3].

Neste estudo, as abordagens de análise mencionadas são aplicadas no projeto de forjamento a frio de um parafuso de cabeça sextavada flangeada. As análises são empregadas para otimizar o ângulo de extrusão da operação intermediária de obtenção da pré-forma.

2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

O objetivo deste estudo é otimizar o processo de fabricação no parafuso telheiro. Atualmente, o fixador é fabricado a partir de dois estágios de forjamento mostrados na Figura 1. No Estágio I, é obtida a pré-forma para a etapa subsequente (Etapa II) de acabamento. A geometria obtida após esta etapa é submetida a laminação para a formação da rosca. O resultado é um parafuso com cabeça sextavada flangeada.

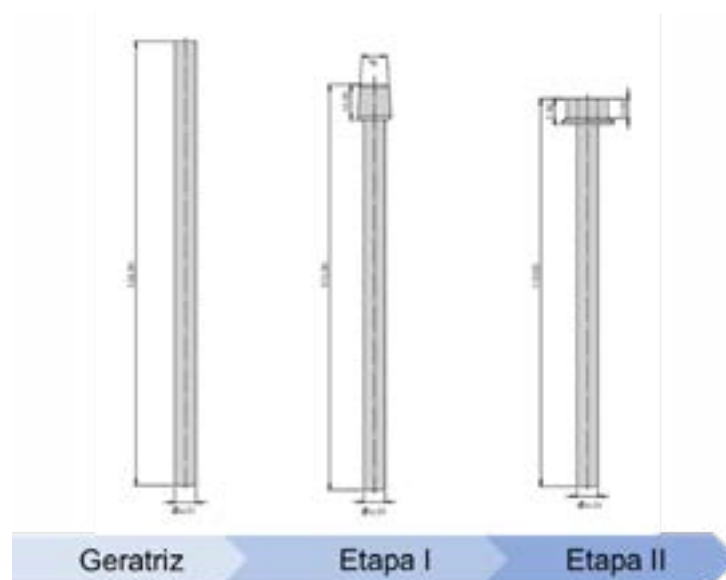


Figura 1 – Etapas de forjamento do parafuso telheiro foco deste estudo.

Para aprimorar a eficiência do consumo de matéria-prima e, conseqüentemente, reduzir os custos de produção, uma nova rota de processo é proposta (Figura 2). O estágio I que consistia apenas em uma prensagem, agora conta com a extrusão direta do corpo do parafuso. O fluxo de material gerado por esta etapa favorece o preenchimento da fase final de acabamento da cabeça sextavada, permitindo a redução da dimensão inicial da geratriz.

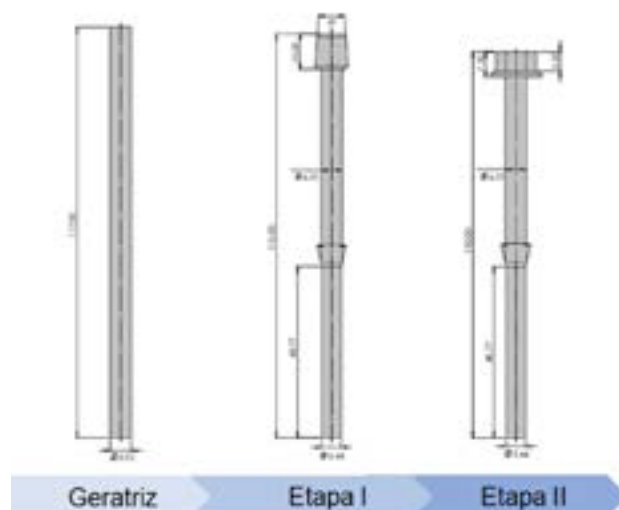


Figura 2 – Nova rota proposta para o forjamento do parafuso telheiro foco deste estudo.

O projeto desta nova etapa de conformação requer a seleção adequada do ângulo de extrusão. Desta forma é possível ampliar a eficiência do processo, reduzindo a força de forjamento requerida, a energia necessária e o desgaste do ferramental.

3. PROCESSO DE EXTRUSÃO DIRETA

Os processos de extrusão são classificados conforme a direção do fluxo do material em relação à direção do movimento da ferramenta. Outro método de classificação desses processos é de acordo com a geometria conformada, ou seja, em componentes maciços e ocos [4]. No processo de extrusão direta maciça, analisado neste trabalho, o fluxo do metal é no mesmo sentido da ação da máquina (punção), onde o produto final é uma peça sólida com perfil determinado pelo formato da matriz, como mostra esquematicamente a Figura 3.

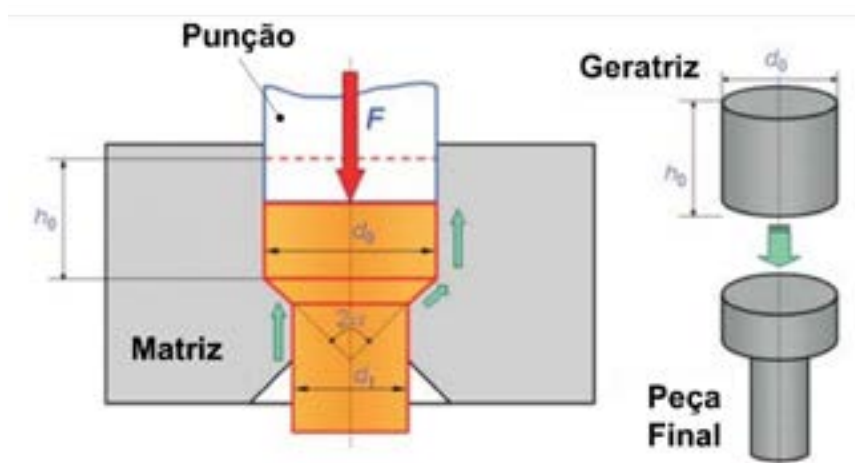


Figura 3 Desenho esquemático do processo de extrusão direta [5].

O valor da força de extrusão direta, no caso em que a matriz apresenta ângulos, pode ser analiticamente obtida utilizando a Equação 1 [6,7]:

$$F = A_0 \cdot k_{fm} \cdot \varphi \cdot \left(1 + \frac{2\mu}{\sin 2\alpha} + \frac{2}{3} \cdot \frac{\alpha}{\varphi} \right) + \pi \cdot d_0 \cdot \mu \cdot k_{f0} \cdot h_k \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo d_0 o diâmetro da geratriz, k_{fm} a tensão de escoamento média, h_k a altura não extrudada, A_0 a seção inicial da geratriz, μ o coeficiente de atrito e α a o ângulo da matriz e φ a deformação verdadeira em relação a área.

No processo de extrusão direta, a deformação principal (φ) é calculada a partir da Equação 2:

$$\varphi = \ln \frac{A_0}{A_1} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde A_0 e A_1 correspondem, respectivamente, a seção da geratriz antes e após a conformação.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo deste estudo é otimizar o ângulo da matriz de extrusão utilizada para gerar a pré-forma de um parafuso telheiro com cabeça sextavada flangeada. Por esta razão, as análises são focadas apenas nesta operação. Tanto os cálculos analíticos, quanto a simulação numérica, foram realizadas considerando apenas a extrusão direta. Foram avaliados 3 valores de ângulo: 11, 13 e 15°.

O material utilizado na fabricação dos parafusos é o SAE 1004. A análise química do aço obtida por espectrometria de emissão óptica por centelha é mostrada na Tabela 1. A composição está dentro da faixa nominal encontrada na literatura [8].

Tabela 1 Composição química (% em peso) do aço SAE 1004.

Material	C	Mn	P	S
SAE 1004	0,03	0,26	0,013	0,011

A força de extrusão é fortemente influenciada pelo comportamento mecânico do material da peça. Para prevê-la, seja numericamente ou através de cálculos analíticos, é fundamental conhecer a curva de escoamento do material de trabalho. Informações

referentes ao comportamento mecânico do material foram obtidas através de ensaios de tração uniaxial. Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de ensaios marca EMIC com capacidade de 600kN seguindo as especificações da normativa ASTM E8/E8M-21 [9]. Foram utilizadas amostras lisas com comprimento útil de 50mm. As amostras foram usinadas a partir de fio máquina do aço SAE 1004 com 6mm de diâmetro.

As simulações numéricas foram realizadas no software QFORM utilizando a análise por elementos finitos do processo de extrusão. Considerando a simetria axial das geometrias, foram realizadas simulações em 2D. Esta técnica de simplificação do modelo reduz a quantidade de elementos gerados e o esforço computacional, permitindo melhorar o refino de malha para aprimorar a qualidade de resultados.

Tabela 2 Parâmetros térmicos, mecânicos e operacionais utilizados na simulação numérica e nos cálculos analíticos do processo de extrusão.

Material da geratriz	SAE 1004
Temperatura da geratriz	20°C
Tipo de Malha da geratriz	Triangular
Material da matriz	Metal duro G-40
Material do punção	AISI H13
Material do extrator	AISI H13
Temperatura das ferramentas	20°C
Coeficiente de atrito	0,05
Máquina de conformação	Prensa excêntrica
Relação entre o raio da manivela e o comprimento da biela	0,17
Comprimento do curso	200mm

Um comportamento de material elastoplástico é atribuído a geratriz que é conformada de acordo com o Critério de escoamento de von Mises. As ferramentas são consideradas rígidas para reduzir o esforço de cálculo. O coeficiente de atrito nas interfaces de contato é considerado constante e com valor de 0,05. Neste estudo, a máquina de conformação é uma prensa excêntrica. Os dados cinemáticos da máquina de conformação foram introduzidos no modelo.

A tabela 2 lista os parâmetros mecânicos e operacionais utilizados na simulação numérica e nos cálculos analíticos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CURVA DE ESCOAMENTO

A curva de escoamento do SAE 1004, obtida experimentalmente, à temperatura ambiente, é mostrada na Figura 4. Nesta condição, o limite de escoamento do material é de 360 MPa. Os resultados foram plotados em escalas logarítmicas para determinar

o coeficiente de encruamento, n , e o coeficiente de resistência C . Assim, a equação de Hollomon que descreve o comportamento mecânico do material quando deformado a frio pode ser expressa por:

$$k_f = 602 \cdot \varphi^{0,12} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde 602 MPa corresponde ao coeficiente de resistência e 0,12 o coeficiente de encruamento do material. A Equação 3 permite que seja estimada a força necessária para o forjamento a frio do material, indica as propriedades mecânicas das amostras conformadas, e, ainda, possibilita a caracterização do comportamento do material através de análise numérica, por elementos finitos [10].

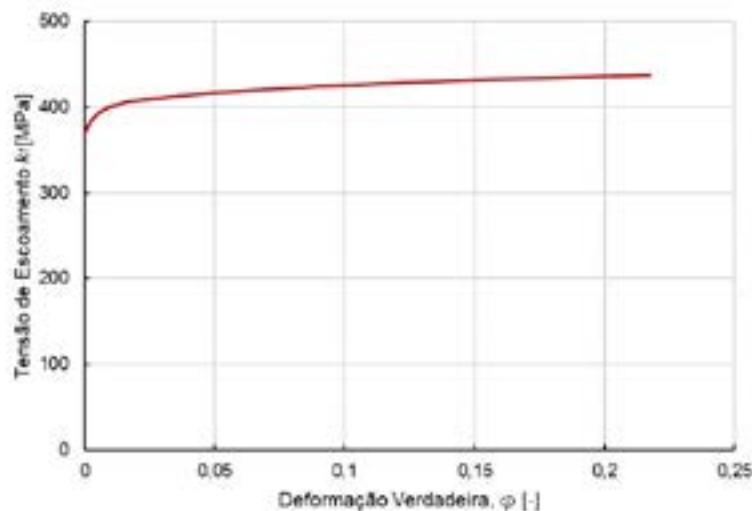


Figura 4 Curva de escoamento do SAE 1004.

Devido especialmente ao baixo conteúdo de carbono, o aço SAE 1004 é caracterizado por uma baixa resistência mecânica. Do ponto de vista da deformabilidade isso é benéfico, uma vez que para maiores resistências as tensões necessárias para a fratura são alcançadas facilmente. A tensão de escoamento ainda determina as tensões que atuam nas ferramentas, podendo limitar a complexidade geométrica da peça, já que elementos complexos levam a um aumento da tensão, podendo exceder a resistência do material da ferramenta [10].

Tabela 1 Propriedades mecânicas do SAE 1004 obtidas em tração uniaxial.

Material	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]
SAE 1004	360	390	22

As propriedades mecânicas obtidas através dos ensaios de tração são listadas na Tabela 3. O limite de escoamento e de resistência encontrados estão dentro da faixa especificada na literatura. Contudo, o alongamento está abaixo dos valores comumente encontrados para o material.

5.2 PROCESSO DE EXTRUSÃO

No processo de extrusão investigado, o diâmetro inicial da geratriz é de 6mm. Após a extrusão, é obtida uma seção com 5,44mm de diâmetro. Neste estudo, são investigadas três geometrias de ferramenta de extrusão com a variação do ângulo da matriz em 11, 13 e 15°. A alteração do ângulo da matriz, altera o volume da geratriz (e do parafuso). A Tabela 4 lista o volume da geratriz para cada condição analisada.

Tabela 4 Efeito do ângulo de extrusão no volume de material utilizado no processo.

Ângulo de Extrusão, α [°]	Volume de material, V [mm ³]
11	3305,82
13	3306,42
15	3306,86

Em comparação com o projeto atual de fabricação do parafuso (Figura 1), a adição da etapa de extrusão corresponde a uma redução de 7% no consumo de matéria-prima.

5.3 CÁLCULOS ANALÍTICOS

A Tabela 5 apresenta os valores de força calculados utilizando a Equação 1 para as três condições analisadas.

Tabela 5 Efeito do ângulo de extrusão na força de Extrusão.

Ângulo de Extrusão, α [°]	Força de Extrusão, F [kN]	Força de Extrusão, F [t]
11	23,26	2,37
13	23,75	2,42
15	24,21	2,47

A força de extrusão direta depende basicamente das propriedades do material, da deformação logarítmica (φ), do ângulo da matriz (α), do coeficiente de atrito (μ) e da geometria inicial da geratriz [6]. Nas condições avaliadas apenas o ângulo da matriz e a altura não extrudada são alteradas. A altura h_k é alterada para manter o comprimento da haste do parafuso e da rosca inalterados mesmo com a mudança do ângulo de extrusão. Como os demais parâmetros da Equação 1 não são modificados, os resultados de força calculados não apresentam grande variação.

5.4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

O fluxo de material e a distribuição de tensão no processo de extrusão é altamente complexo e dependente do projeto de matriz [11]. A influência do ângulo da matriz nas relações cinemáticas do processo foram analisadas a partir das simulações numéricas.

A Figura 5 mostra a distribuição de deformação equivalente após o processo de extrusão. A alteração do ângulo de extrusão modifica o comportamento do fluxo de material e como resultado a distribuição da deformação plástica também é alterada. O valor máximo de φ_{eq} variou entre 0,36 (para $\alpha = 11^\circ$) até 0,54 (para $\alpha = 15^\circ$).

A Figura 6 mostra o resultado numérico da distribuição da tensão equivalente após o processo de extrusão. Conforme o ângulo da matriz aumenta, a magnitude da tensão equivalente no material de trabalho também se eleva.

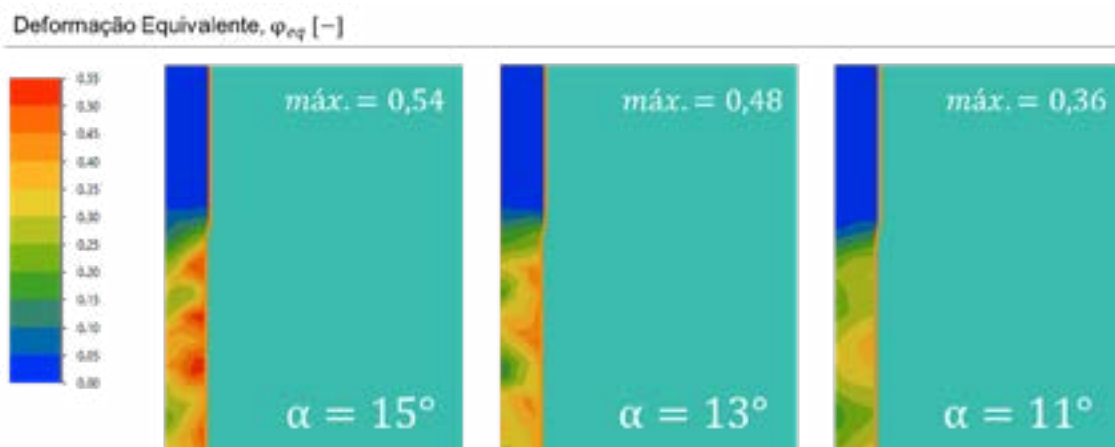


Figura 5 Distribuição de deformação equivalente ao longo da peça extrudada.

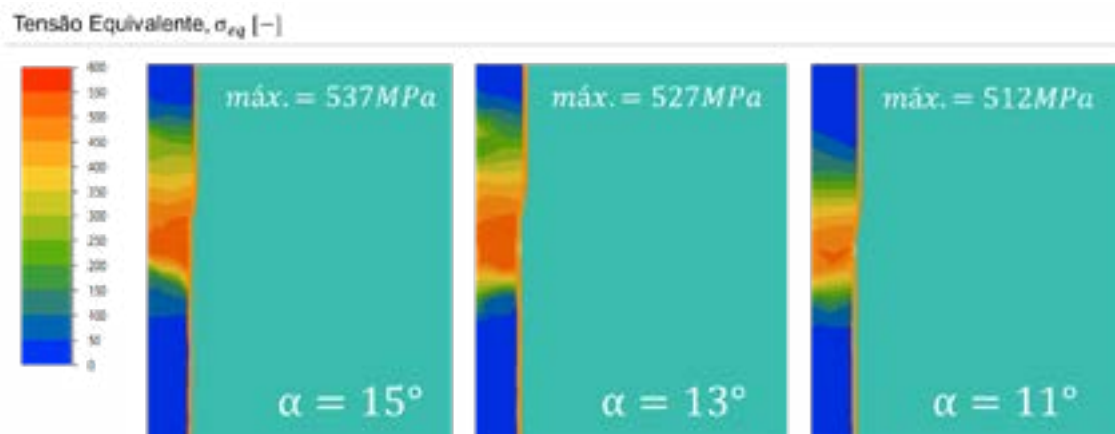


Figura 6 Distribuição de tensão equivalente ao longo da peça extrudada.

A Figura 7 mostra a variação da força de extrusão em relação ao tempo obtida por elementos finitos. O comportamento da força é típico do processo de extrusão direta. Neste processo, a força aumenta abruptamente no estágio inicial da conformação com o punção empurrando o material através da matriz. À medida que o processo continua, a força reduz suavemente [12].

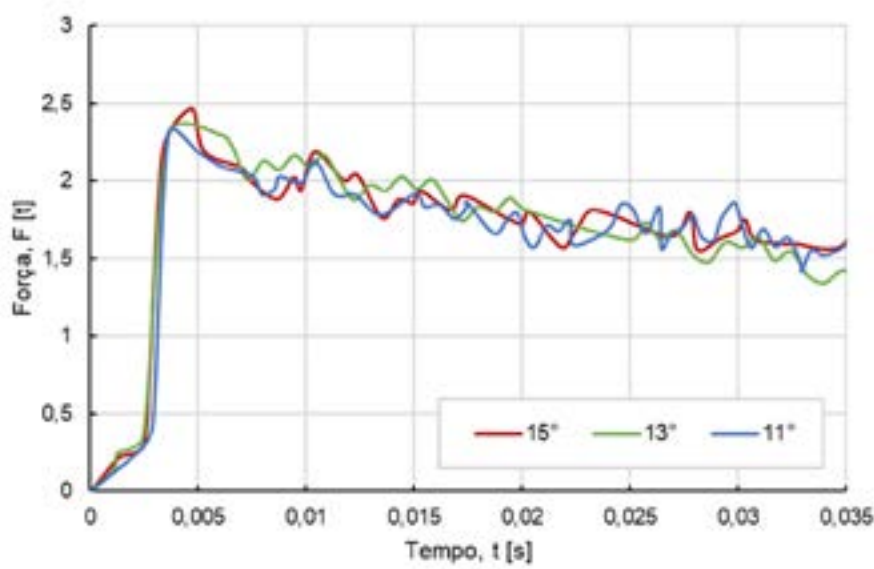


Figura 7 Variação da força de conformação com o tempo.

Os resultados obtidos por elementos finitos convergem com os alcançados pela abordagem analítica demonstrando que a força de conformação aumenta com o aumento do ângulo da matriz. Segundo a simulação numérica, a força máxima foi de $2,49t$ para $\alpha = 15^\circ$, $2,35t$ para $\alpha = 13^\circ$ e $2,30t$ para $\alpha = 11^\circ$. O maior desvio entre as abordagens analíticas e numéricas foi de apenas 3%.

6. CONCLUSÕES

Neste estudo, foram aplicadas abordagens analíticas e simulações numéricas para otimizar o processo de fabricação de um parafuso telheiro com cabeça sextavada flangeada, com foco na etapa de extrusão direta. A nova rota proposta apresentou uma redução significativa de 7% no consumo de matéria-prima em comparação com o método tradicional de fabricação. Isso reflete não apenas em benefícios econômicos, mas também em práticas mais sustentáveis.

As análises de força através de cálculos analíticos e simulações numéricas convergiram, demonstrando a precisão e confiabilidade das abordagens utilizadas. A distribuição de

tensão e deformação ao longo da peça extrudada foi influenciada diretamente pelo ângulo da matriz, destacando a importância do projeto adequado das ferramentas para o sucesso do processo de conformação.

O estudo reforça a relevância do emprego de análises numéricas e cálculos analíticos no projeto de processos de fabricação, proporcionando uma compreensão mais profunda do comportamento do material e permitindo tomadas de decisões fundamentadas. A otimização do processo não apenas aumenta a eficiência, mas também contribui para a qualidade do produto final e para a competitividade no mercado.

Diante dos resultados obtidos, fica evidente que a combinação de conhecimentos de engenharia, análises avançadas e tecnologias de simulação é essencial para a inovação e o aprimoramento contínuo dos processos industriais. A abordagem integrada adotada neste estudo serve como exemplo para aprimorar a eficiência de produção em outras áreas da indústria, buscando a excelência na qualidade, sustentabilidade e competitividade.

REFERÊNCIAS

- [1] PRECEDENCE RESEARCH, Bolts Market (By Material: Metal, Plastic, Others; By End-User: Furniture, Construction, Lawn and Garden, Heavy Machine Equipment, Aerospace, Petrochemical, Motors and Pumps, Automotive, Home Appliances, Plumbing Products, Others) - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, Regional Outlook, and Forecast 2023-2032, 2023.
- [2] VOLLRATH K., Simulation of forging processes, Deutsche Massivumformung, 2013.
- [3] ALTAN T., Cold and Hot Forging Fundamentals and Applications, ASM International Materials Park, 2005.
- [4] LANGE K., Handbook of metal forming, McGraw-Hill, New York, 1985.
- [5] JURKOVIC Z., BREZOČNIK M., GRIZELJ B., MANDIĆ V., Optimization of extrusion process by genetic algorithms and conventional techniques, Technical Gazette 16, 2009.
- [6] JURKOVIC M., JURKOVIC Z., CUKOR G., Genetic algorithm application in optimization of extrusion forming process, 10 International Scientific Conference on Production Engineering – CIM 2005, Lumbarda, 2005, IV53-IV62.
- [7] MONTGOMERY D.C., Design and analysis of experiments, Fifth Edition, John Wiley & Sons, Inc., NewYork, 2003.
- [8] NAYAR, A., The Steel Handbook, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, Índia. ASTM E8/E8M-21, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, American Society for Testing and Materials, 2021.
- [9] ROSIAK A., COSTA L.L., ALBA D.R., SANTOS T.G., SCHAEFFER L., Estudo da deformabilidade a frio da liga de alumínio AA6351, Brazilian Journal of Development, 2020.
- [10] MOHAMMED R.J., Effect of Die Angle on Stress Distribution in Extrusion Process of Aluminum Rod, Basrah Journal for Engineering Sciences, vol. 14, no. 2, 2014.
- [11] KONG L. X., On-line tool condition monitoring and control system in forging processes, Journal of Materials Processing Technology, Volumes 125–126, 9, Pages 464-470, 2002.



42° SENAFOR



24ª CONFERÊNCIA NACIONAL DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS
24TH NATIONAL SHEET FORMING CONFERENCE

11ª CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS
11TH INTERNATIONAL SHEET METAL FORMING CONFERENCE

8º CONGRESSO DO BRDDRG
8TH BDDRG CONGRESS

PALESTRAS E TRABALHOS TÉCNICOS LECTURES & TECHNICAL PAPERS

CHAPAS 1

Previsão do Desgaste de Ferramentas de Corte por Puncionamento Utilizando Redes Neurais Artificiais.

Prediction of Punching Tools Wear Using Artificial Neural Networks.

Andre Rosiak (CBCM – UFRGS); Thomas Gomes dos Santos, Diego Pacheco Wermuth, Lirio Schaeffer (UFRGS)

CHAPAS 2

Últimos avanços em processos baseados em fricção e mistura: soldagem multimateriais, deposição e reciclagem de cavacos metálicos.

Last advances on Friction Stir Based processes: multi-material welding, deposition and metallic chips recycling.

Prof. Livan Fratini (University of Palermo, Italia)

CHAPAS 3

De Volta às Raízes: Conceitos de Produção de Aços ARBL-Alta Resistência e Baixa Liga Avançados destinados ao Setor Automotivo.

Back to the Roots: Production Concepts for Advanced Automotive HSLA – High Strength Low Alloy Steels

Ed Juarez Mendes Taiss, Paulo Haddad, Fabio D’Aiuto (CBMM) e Hardy Mohrbacher (NiobelCon bvba)

CHAPAS 4

Otimização de pre-forma para manufatura de componentes híbridos polimérico-metálicos por meio de conformação in tandem

Preform optimization for manufacturing process of metal-polymer hybrid components through in tandem forming

Diego R. Alba, Alexander Weiß, Mathias Liewald (Institute for Metal Forming Technology (IFU) University of Stuttgart Alemanha)

CHAPAS 5

Estudo Experimental das Variáveis Tribológicas que Afetam a Adesão em Ferramentas Durante a Estampagem.

Experimental Study of Tribological Variables Affecting Tool Adhesion During Stamping.

Angélica Paola de Oliveira Lopes, Diego Tolotti de Almeida, Vágner Braga (Bruning Tecnometal), Cristiano José Scheuer (UFSM) e Henara Lillian Costa Murray (FURG)

CHAPAS 6

Avaliação do Limite de Conformação de Aços Avançados de Alta Resistência a Partir de Análise Dic e Limite de Estricção

Forming Limit Analysis of Advanced High Strength Steel Through Dic and Necking

Murilo do Nascimento Cruz, Paulo Victor Prestes Marcondes e Ravilson Antônio Chemin Filho (UFPR)

CHAPAS 7

A importância da Curva Limite de Conformação na seleção de materiais para peças estampadas.

The Forming Limit Curve role regarding material definition for stamping goods.

Fabricio Dreher Silveira (Renner Herrmann SA)



42° SENAFOR



24ª CONFERÊNCIA NACIONAL DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS
24TH NATIONAL SHEET FORMING CONFERENCE

11ª CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS
11ST INTERNATIONAL SHEET METAL FORMING CONFERENCE

8º CONGRESSO DO BRDDRG
8TH BDDRG CONGRESS

CHAPAS 8

Comparativo de estampabilidade entre um aço microligado e um aço Carbono-Manganês

Stampability comparison between high strength low alloy and carbon-manganese steels

Daniel Augusto Ferro (Waelzholz Brasmetal); Fernando Generoso (ArcelorMittal)

CHAPAS 9

Previsão de fratura prematura em aços multi-fase durante flangeamento de borda.

Prediction of premature fracture in multiphase steels during edge flanging.

João H. C. de Souza (TechnNOVA), Lucas Peres (USP), Gilmar Batalha (USP)

CHAPAS 10

Viabilidade de soldagem por resistência à ponto de aços AHSS processados pelo método de Press Hardening.

Feasibility of resistance spot welding of steel AHSS processes by the Press Hardening method.

Oéllissom de Lima, Angelica Paola de Oliveira Lopes, Deocleber Padilha, Lucas Werner, Márcio Pedroso Ribeiro, Fabrício Carlos Schimidt e Diego Tolotti (Bruning Tecnometal); Felipe Tusset e Patricia Pedrali (UNIJUI)

CHAPAS 11

Como a engenharia avançada pode auxiliar na armação de carrocerias.

How advanced engineering can help in the assembly of car bodies.

Eduardo Sulato (GME Automotive)

CHAPAS 12

Otimização de parâmetros de estampagem aplicada à manufatura de componentes aeronáuticos.

Optimization of sheet metal forming parameters applied in aircraft parts manufacturing

Rafael Buosi Bassan, Vinícius Lourenço del Campo (EMBRAER)

CHAPAS 13

Tailor Rolled Blanks: Tecnologia Inovadora para Otimizar Propriedades e Reduzir o Peso de Peças Estampadas.

Tailor Rolled Blanks: Innovative Technology for Optimizing Properties and Reducing the Weight of Stamped Parts

André Rosiak; Lirio Schaeffer (Centro Brasileiro de Inovação em Conformação Mecânica / UFRGS)

CHAPAS 14

Avaliação da Aplicabilidade de Ligas de Alumínio de Alta Resistência na Fabricação de Componentes Estruturais Automotivos em Operação de Estampagem a Quente.

Feasibility Analysis of High Strength Aluminium Alloys to Manufacture Structural Automotive Components through Hot Stamping Processing

Rafael Pandolfo da Rocha, Matheus Henrique Riffel, Diego Rafael Alba, André Rosiak, Thomas Gomes dos Santos e Lirio Schaeffer (CBCM / UFRGS)

CHAPAS 15

Estampagem a Quente de Aços Avançados de Alta Resistência (AHSS): uma Análise dos Principais Estudos Desenvolvidos no LdTM / UFRGS.

Hot Stamping of Advanced High Strength Steels (AHSS): a Review on the main Studies Developed by LdTM / UFRGS.

Rafael Pandolfo da Rocha, Matheus Henrique Riffel, Diego Rafael Alba, André Rosiak, Thomas Gomes dos Santos e Lirio Schaeffer CBCM/UFRGS



42° SENAFOR



24ª CONFERÊNCIA NACIONAL DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS
24TH NATIONAL SHEET FORMING CONFERENCE

11ª CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS
11ST INTERNATIONAL SHEET METAL FORMING CONFERENCE

8º CONGRESSO DO BRDDRG
8TH BDDRG CONGRESS

CHAPAS 16

Análise Numérica do Desempenho de Canais de Resfriamento Retos e Conformais para Aplicações de Estampagem a Quente

Numerical Analysis of the Performance of Straight and Conformal Cooling Channels for Hot Stamping Applications

Bruno Caetano dos Santos Silva, Luís Fernando Folle, Luã Fonseca Seixas, Tiago Nunes Lima e Rodrigo Santiago Coelho (SENAI CIMATEC - Instituto SENAI de Inovação (ISI) em Conformação e União de Materiais (CIMATEC ISI C&UM), Salvador, Brasil) e Gilmar Ferreira Batalha (Universidade de São Paulo - Escola Politécnica, São Paulo, Brasil)

CHAPAS 17

Determinação de Curva Limite de Conformação à quente.

Determination of Hot Forming Limit Curve.

Luis Fernando Folle, Matheus Passos Sarmento Santos, Tiago Nunes Lima, Bruna Callegari e Bruno Caetano dos Santos Silva (SENAI CIMATEC - Instituto SENAI de Inovação (ISI) em Conformação e União de Materiais (CIMATEC ISI C&UM), Salvador, Brasil).

CHAPAS 18

Modelo de Material na Simulação: Por que a Caracterização é Fundamental?

Material Model in Simulation: Why is characterization essential?

Ibson Ivan Harter, Ilton Dessbesell, Lindolfo Sturmer, Rogerio Moura Machado, Diego Tolotti de Almeida, Fabrício Carlos Schmidt (Bruning Tecnometal)

CHAPAS 19

Ferramentas inteligentes para Estamparias Inteligentes.

Smart Tools for Smart Press Shops.

João H. C. de Souza (TechnNOVA), Otto Lampert (iLariz GmbH)

CHAPAS 20

Métodos de Deformação Localizada para Redução de Sidewall Curling.

Localized Deformation Methods for Reducing Sidewall Curling

Ricardo A. M. Viana, Olavo Carvalho Haase e Alisson da Silva Duarte (UFMG / SIXPRO – MG)

CHAPAS 21

Preparação otimizada dos dados de fresamento para matrizes de estampagem

Optimal milling data preparation for draw dies

Leandro G. Cardoso, Matthias Peter, Bart Carleer (AutoForm do Brasil)

CHAPAS 22

Aplicação de resultados de análises estocásticas de estamparia aos processos de montagem de carrocerias

Applying stochastic stamping analysis results to the BiW assembly processes

Leandro G. Cardoso, Luis Augusto Castilho Valdo (AutoForm do Brasil)

CHAPAS 23

Inteligência Artificial (IA), conceitos, soluções, desafios e oportunidades para indústria

Artificial Intelligence (AI): Concepts, Solutions, Challenges, and Opportunities for Industry

Roderval Marcelino, Iury Melo Américo, Nicolas Cechinel Rosa (UFSC Campus Araranguá – SC) e Lirio Schaeffer (UFRGS)



42º SENAFOR



24ª CONFERÊNCIA NACIONAL DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS
24TH NATIONAL SHEET FORMING CONFERENCE

11ª CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS
11ST INTERNATIONAL SHEET METAL FORMING CONFERENCE

8º CONGRESSO DO BRDDRG
8TH BDDRG CONGRESS

CHAPAS 24

Indústria 4.0 na Prática para Gestão Inteligente de Ferramentas.

Industry 4.0 in Practice for Intelligent Tool Management.

Aézio Almeida dos Santos (Bosch do Brasil)

CHAPAS 25

Modelo de Arquitetura de Software Utilizada para Implementação da Indústria 4.0 na Conformação Mecânica

Architecture Software Model Using In Mechanical Forming to Implement Industry 4.0

Fabio Tiburi, Lirio Schaeffer (UFRGS)

TRABALHO EM PÔSTER

Exposição dos painéis nos dias 4, 5 e 6 de outubro

Processo de União de Chapas Metálicas por Conformação: uma revisão sobre o Clinching

Metal Sheet Joining by Forming Process: A Review on Clinching

João Vinícius de Souza Vares (IGP-RS), Rafael Pandolfo da Rocha, Halston Mozetic,

Lirio Schaeffer (UFRGS)

Previsão do Desgaste de Ferramentas de Corte por Puncionamento Utilizando Redes Neurais Artificiais

Prediction of Punching Tools Wear Using Artificial Neural Networks

Resumo:

O desgaste das ferramentas de corte por puncionamento é um fator crítico que afeta a eficiência e a qualidade dos processos de estampagem. Neste artigo, uma abordagem de monitoramento e controle contínuo do processo é proposta. Dados gerados a partir do sensoriamento são utilizados para treinar redes neurais artificiais (RNAs), possibilitando a previsão do desgaste das ferramentas. Imagens da superfície de corte são relacionadas com a progressão da deterioração do ferramental. Como resultado, é possível implementar a manutenção proativa e ampliar o controle do processo. Paralelamente, a análise numérica por elementos finitos foi aplicada para ampliar a compreensão dos fenômenos que ocorrem durante o processo de corte. A abordagem se mostrou uma alternativa ágil e eficaz para auxiliar na tomada de decisão e otimizar o planejamento de manutenção, reduzindo os tempos de parada e custos de produção.

Palavras-chave:

Inteligência Artificial; Redes Neurais Artificiais; Desgaste.

Andre Rosiak (CBCM), Thomas Gomes dos Santos, Diego Pacheco Wermuth e Lirio Schaeffer (UFRGS)



42nd SENAFOR
26th International Forging Conference
25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming
Conference / 9th BrDDRG Congress
12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/ RS
October 4-6, 2023

Back to the Roots - Production Concepts of Advanced HSLA – High Strength Low Alloy Steels for Automotive Application

Ed Juarez Mendes Taiss - CBMM Consultant ⁽¹⁾

Paulo Haddad – CBMM Market Development Latin America Manager ⁽²⁾

Fabio D’Aiuto - CBMM Automotive Market Development ⁽³⁾

Hardy Mohrbacher - NiobelCon bvba ⁽⁴⁾

ABSTRACT

During the 80’s the HSLA Grades – High Strength Low Alloy Steels were an important alloy design concept in order to save mass and attend the demand of fuel consumption reduction and increment of safety that was starting to be required. Already, in the 90’s an important consortium was created by the most important steel makers, The WorldAutoSteel.

Currently, WAS had cataloged a wide portfolio of steels for the automotive segment.

This work shows HSLA Steels - Status Quo and the development goal that the steel makers are working to achieve the balance of steel application in car bodies, conciliating the OEM’s targets of emissions and safety and the local manufacturing available on the local automobile industrial park, creating options for the project engineering.

Key words — HSLA, Advanced Steels, Automotive Application.3rd Generation

INTRODUCTION

Nowadays the modern automotive structures aim affordable manufacture cost and high performance in order to reduce mass and emissions, achieving the safety targets. But, the Implementation in car bodies using complex advanced steels grades implies manufacturing issues such as local formability and welding to get an better cost-performance requiring state of art steel processing lines.

Nowadays, the WorldAutoSteel had been catalogued a wide portfolio of steels, including conventional High Strength Steels (HSS), High Strength Low Alloy (HSLA), Bake Hardening steels (BH), Advanced High-Strength Steels (AHSS) such as Dual Phase (DP), Transformation-Induced Plasticity Steels

(TRIP), Press Hardening Steels (PHS) and also also 2nd Generation AHSS (TWIP) and 3rd Generation of AHSS to improve the elongation, local formability, edge stretch and bending characteristics.

During the last few years, with the advancement of multiphase steels in the structural projects of passenger vehicles, HSLA steels have become more restricted to commercial vehicles, especially for application in chassis, supplied in the hot-rolled condition. Despite this trend, the latest advances in the development of cold-rolled and coated HSLA steels have been create another option for passenger car designers.

The implementation of increasingly complex advanced steel grades often presents manufacturing problems such as local formability, welding and often requires specific steel processing lines. Due of that, the HSLA steels can still use due to consistent manufacturing performance in forming and joining, global availability and affordable cost.

HSLA STEELS - STATUS QUO & DEVELOPMENT GOAL

Hot Rolled - HSLA steels have been developed to mitigate strength, toughness and weldability in a large variety of applications such as Energy, Structural and Automotive segments.

Considering the automotive applications, the HSLA-Hot Rolled is the 1st option for commercial vehicles, promotion mass reduction and increasing the pay load, replacing C-Mn Mild steels and HSLA High Strength Steel (YS = 200 to 400 MPa) for HSLA Steels High Strength (YS = 600 to 700 MPa).

Recent China developments applied steel grades for truck frames with 600 MPa yield strength and higher, focusing on steel chemistries with low carbon content and Nb-Ti microalloyed. With this concept either polygonal and acicular ferrite or bainite microstructure with precipitation strengthening can be adjusted depending of processing conditions in the hot-strip mill. Due to fine grain size and low carbon content these steels intrinsically feature high toughness.

For 700 MPa yield strength most concepts are based on 0.06%C-1.8%Mn 0.06%Nb-Ti-Mo alloying. This concept exhibits a remark able robustness against temperature variations during the hot-strip mill processing. The ferrite microstructure usually shows higher elongation while the bainite microstructure offers better toughness. Production material of several steel makers using this alloy concept reached Charpy toughness values of over 100 Joules at -20 °C.

Figure 1 shows the tension tests results and bending performance [1].

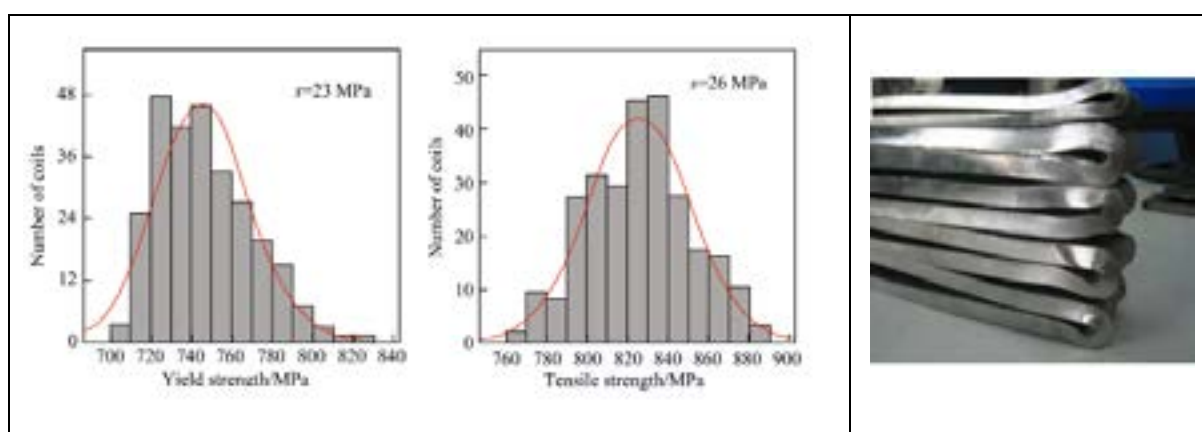


Figure 1 - Tension tests results showing a narrow distribution and Bending Performance of Hot Rolled HSLA 700 MPa, niobium microalloyed yield strength [1].

The Brazilian mining company Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração (CBMM) conducted a design change of their dump trucks by upgrading from mild steel to high strength niobium microalloyed

steel having yield strength above 700 MPa and accordingly reducing the part thickness. A weight reduction of more than 1 900 kg was achieved leading to an increased loading capacity of 1.5 t [2]

The New project promotion either transportation costs reduction by 3%, reduction of fuel consumption: by 8.1%, reduction of tire consumption by 7.5% and reduction of GHG emissions 50 t/year and structural failures reduction that improve the time of trucks in service.

Figure 2 and 3 show details of CBMM Dumper Truck development. [7] [8].



Conventional Design Truck Actros-210 + Dumper – 2010 18,500 Kg	New Design Truck Actros - 4844 - 2013 + Duper – 2013 17,000 Kg
	

Figure 2 - CBMM Development – Araxá Mining Dumper Truck[7] [8].

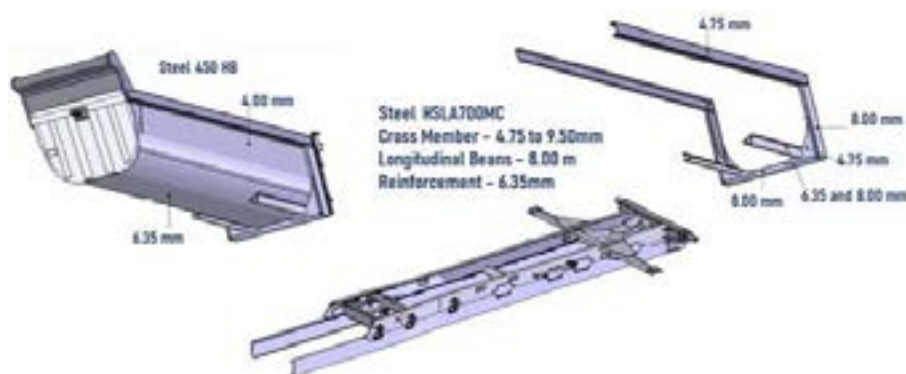


Figure 3 - Structural Components and Duper Details [7] [8].

STRENGTHENING MECHANISMS – HSLA STEELS HOT ROLLED AND COLD ROLLED

HSLA steels are available in either Hot Rolled or Cold Rolled condition with Low Carbon content and Fine Grain Size promoted by micro alloying, especially niobium. Hot Rolled HSLA steels typically reach higher strength levels (YS: 700 – 800 MPa) and in some cases 960 MPa.

This resistance results from the application of several strengthening mechanisms, which are not based on an increase of perlite in steel. Characteristic strengthening mechanisms for HSLA steels, in general, are grain boundary strengthening (grain refinement), solid solution strengthening (substitution, interstitial), precipitation and dislocation strengthening.

High-strength structural steel S960MC is produced by a thermo-mechanical controlled process. For S960MC steel, the increased strength is achieved mainly on the basis of grain refinement, precipitation strengthening by precipitates of type (Ti, Nb) (C, N) and dislocation strengthening based on multiple deformation in the rolling process. The microstructure of steel, which consists of fine-grained martensite and bainite [3].

On Cold Rolled HSLA steels for the same alloy concept achieve a lower strength than hot rolled ones. VDA 239-100 standard, that describes the requirements for uncoated and continuously coated, surface treated, cold rolled and hot rolled sheet steel materials, currently defines CR460LA ($R_{p0.2}$ -long: 460-580 MPa) as highest grade, that and selected steel suppliers produce HSLA grades equivalent to CR500LA and higher grades is under developments.

The concept for Cold-Rolled HSLA Steels with yield strengths exceeding 550 MPa and favorable balances of global and local formability as well as excellent weldability is under development or recently launched by the steel makers. The resistance on cold rolled steel results due strengthening mechanisms of solid solution, precipitation, especially NbC and grain refinement.

Figure 4 show the strengthening mechanisms on Hot Rolled and Cold rolled Steels.

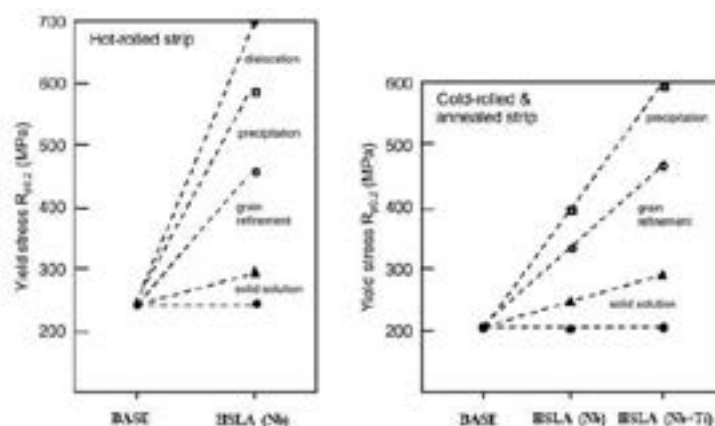


Figure 4 - Contributions of individual strengthening mechanisms to yield strength in hot-rolled and cold-rolled and annealed strips [1].

The annealing process, after cold rolling, promotes recrystallization, sometimes excessive, and consequently grain coarsening, as well as reduces the dislocation density. This occurrence promotes strength loss, but the right alloy concept & adequate processing parameters can mitigate the strength loss.

EFFECT OF HOT ROLLING FINISHING CONDITIONS - MICRO ALLOY PRECIPITATE STATUS

Niobium carbo-nitride particles will dissolve at the usual soaking temperatures (1200- 1250°C) due to the typical low carbon content (0.04-0.07 wt.% C) of modern HSLA steels. Full dissolution of niobium additions up to around 0.10 wt.% Nb is thus possible for hot strip mill processes.

The amount of solute niobium at the finish-rolling temperature has the effect of delaying austenite-to-ferrite transformation and, thus, further contributes to grain refinement. The conditions of cooling strip on run out table in a Hot Strip Mill and the coiling temperature determine the precipitation of the supersaturated solute niobium during or after the phase transformation.

The HSLA steels produced on HSM-Hot Strip Mill are being performed with short inter pass time between the finishing reductions and considering the cooling temperature is possible to choose two coiling strategies:

- (1) High temperature coiling to minimize residual micro alloy elements content with relatively soft hot strip with limited subsequent strengthening potential.
- (2) Fast cooling to retain majority of micro alloy elements in solution promoting a high subsequent strengthening potential with precipitation during annealing recrystallization after cold rolling.

Figure 5 - Nb Solute and Precipitated Particle size vs. coiling temperature on hot rolling process [1].

Low coiling temperature (400°C) retains major share of niobium in solid solution and with suitable combination of annealing time and temperature determines maximum precipitation.

Figure 6 shows maximum achieved tensile properties using this coiling and annealing adequate strategies [5].

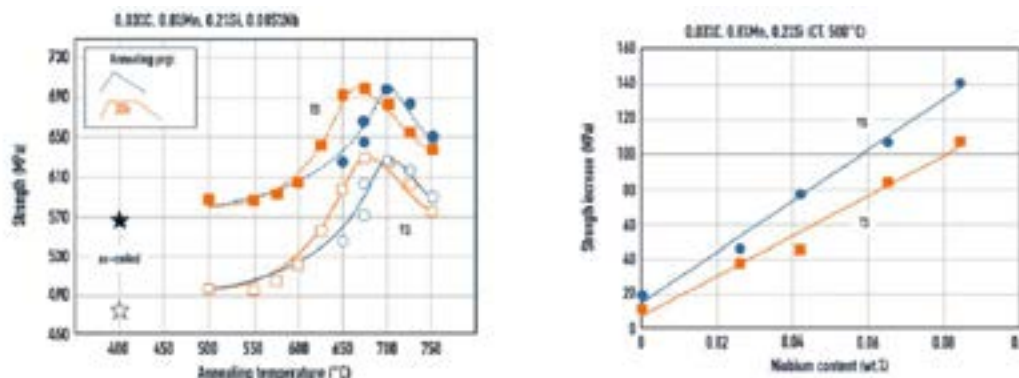


Figure 6 - Short-Cycle Annealing Treatment of low temperature coiled of Hot Rolled Strip [5].

Regarding the production of cold-rolled HSLA steels, two principal annealing technologies define the potential of strength and forming properties.

Batch annealing (BA) relies on relatively low annealing temperatures (< 700°C) and long holding times (> 20 h) allowing metallurgical processes to approach equilibrium conditions.

Continuous annealing (CA) processes operate at higher peak temperatures (> 750°C) and much shorter times (< 120 s). The Metallurgical processes are progressing (far) outside equilibrium and may kinetically compete with each other. [1]

EFFECTS OF NIOBIUM DURING RECRYSTALLIZATION ANNEALING

The recrystallization degree according the annealing temperature for a short annealing cycle and the effect of the recrystallization retarding effect by adding niobium of low-carbon manganese steel is showed in the Figure 6.

Full recrystallization considering annealing condition is promoted by amount of microalloyed niobium added and cold reduction applied. For partial recrystallization is possible to achieve strength ranges between 500 and 650 MPa. Higher strength can be reached under the condition of recovery annealing achieving strength comparable the hot-rolled HSLA 700 MPa.

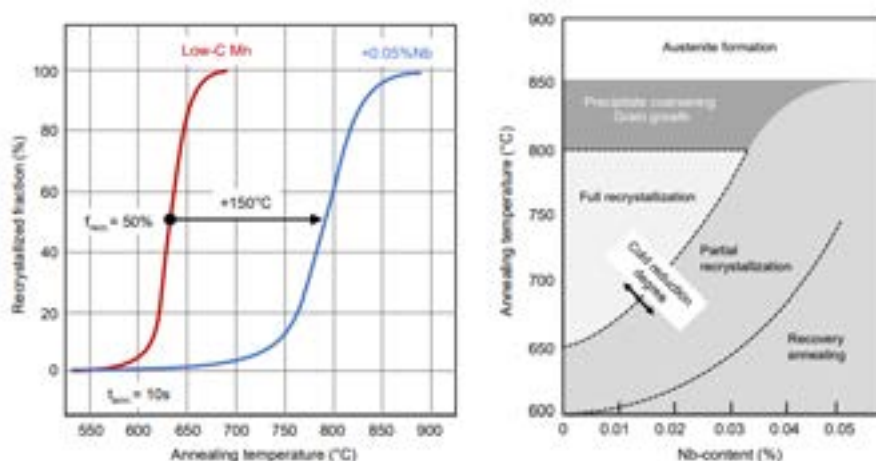


Figure 6 - (a) Annealing temperature effect and niobium addition on the recrystallization degree for short annealing cycles (10 s); (b) operating windows for processing in continuous annealing lines [1].

For continuously annealing of HSLA steel grades different scenarios are possible. The Figure 7 shows the tensile properties considering full recrystallization, reaching strength at below 500 MPa with good elongation. For recovery annealing the yield strength can achieved 750 MPa.

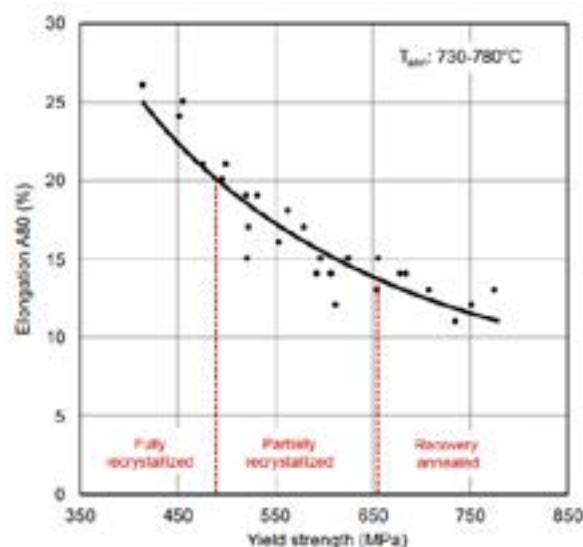


Figure 7- Tensile Properties for Cold-Rolled HSLA steels considering the Annealing Strategy [1].

Niobium retained in solid solution after hot rolling has the potential for precipitating during the annealing cycle after cold rolling. The progress of that precipitation depends on the annealing temperature and the strip speed in the continuous annealing line. The Figure 8 shows the continuous annealing strategies.

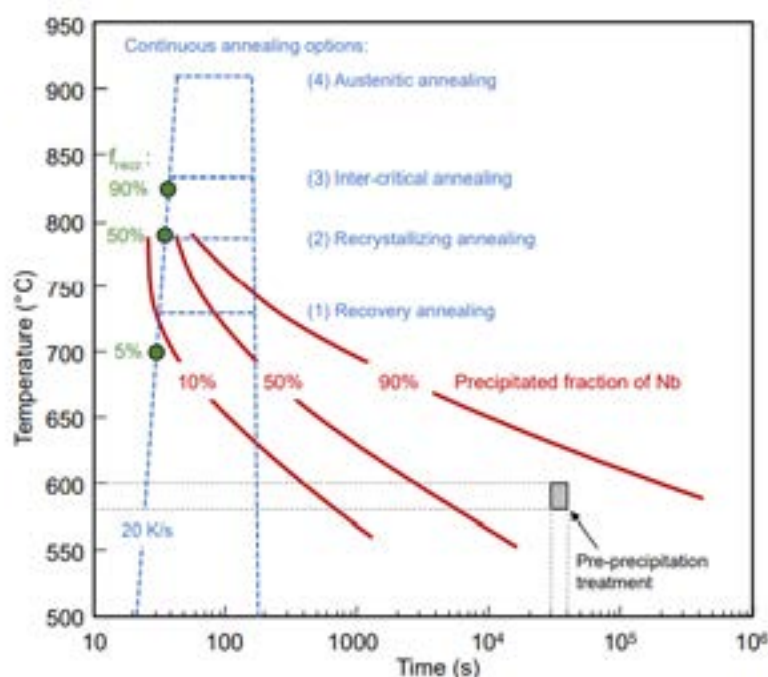


FIGURE 8 - Traditional and innovative continuous annealing approaches

NIOBIUM PRECIPITATE EVOLUTION DURING ANNEALING CYCLE

The precipitates status depends on the coiling conditions and the intermediate annealing treatment. For identification of niobium precipitate evolution during annealing cycle were set some coiling and annealing strategy:

Low coiling temperature retains most niobium in solid solution and niobium precipitation almost complete during short annealing cycle. Higher coiling temperature anticipates the niobium precipitation and nearly complete precipitation occurs during annealing cycle.

The experiment potential of precipitation hardening can be reached more than 90% of its hardening capacity achieving high HSLA grades. Figure 9 shows the hardening potential produced by niobium precipitates [5].

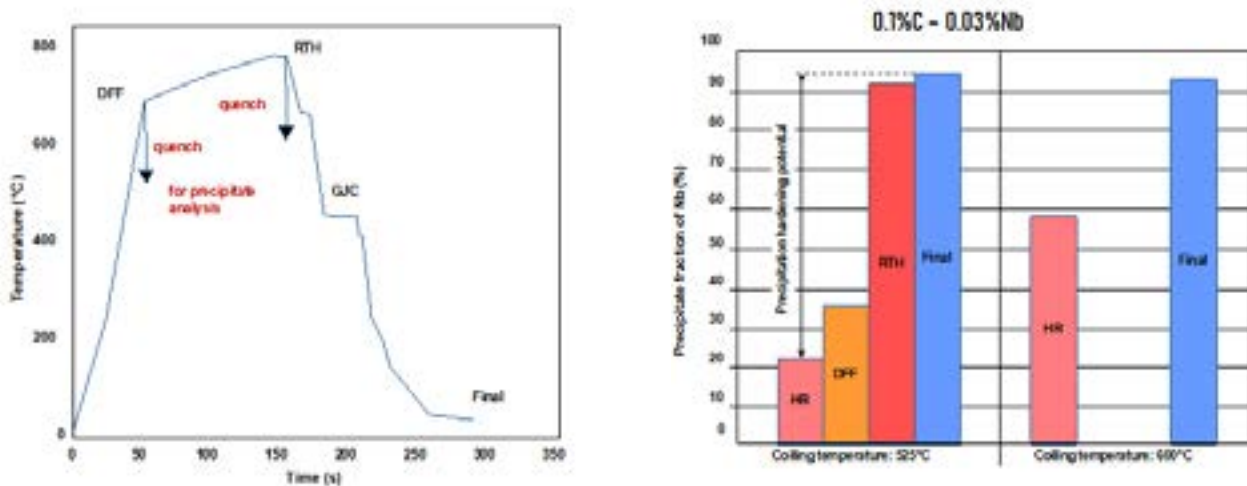


Figure 9 - Hardening potential produced by niobium precipitates [5].

SUPER HSLA CONCEPT – PROCESSING QUALIFICATION

The experiment approach tested an extra-low carbon steel with 0.05%Nb, conventional industrial hot rolling with coiling temp.: ~500°C and lab cold rolling and continuous annealing cycle setting different annealing temperatures. The figure 10 shows the True Stress vs. True Strain curves for different annealing temperatures [5].

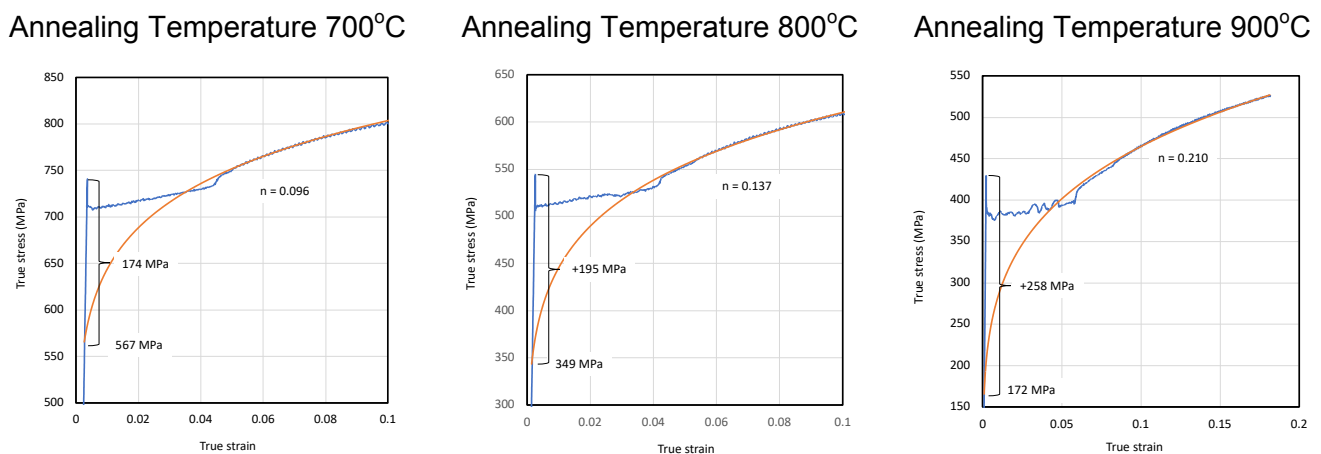


Figure 10 – True Stress vs. True Strain curve for different annealing temperatures.

PROPERTY RANGE IN FUNCTION OF PROCESSING SCENARIO

The tensile properties were measured considering Batch and Continuous annealing with different annealing temperatures for low and high cold reduction. According the strategy adopted is possible to balance the strength and elongation for each forming required.

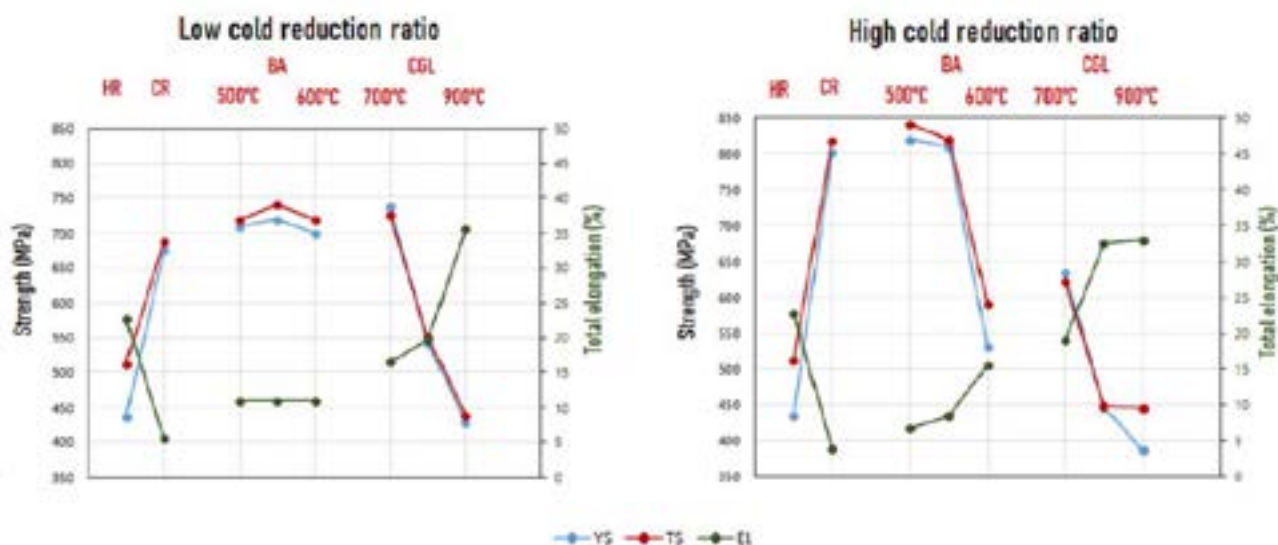


Figure 11 - Tensile Properties according to the Process Strategy [5].

TENSILE PROPERTY – CONTINUOUS GALVANIZING LINE

Regarding the tensile properties, in this chapter, were evaluated the influence of cold rolled reduction and annealing temperature on low carbon Nb and Nb-Mo microalloyed steel.

Setting adequate cold-rolled process parameters is possible to reach HSLA steels with yield strengths exceeding 550 MPa with favorable balances of global and local formability.

The Figure 12 correlates the yield strength properties with process parameters applying different cold rolled reduction and annealing temperature for Nb and Nb-Mo low carbon microalloyed steel. On the same figure shows the niobium precipitation strengthening influence on the elongation for different annealing temperature.

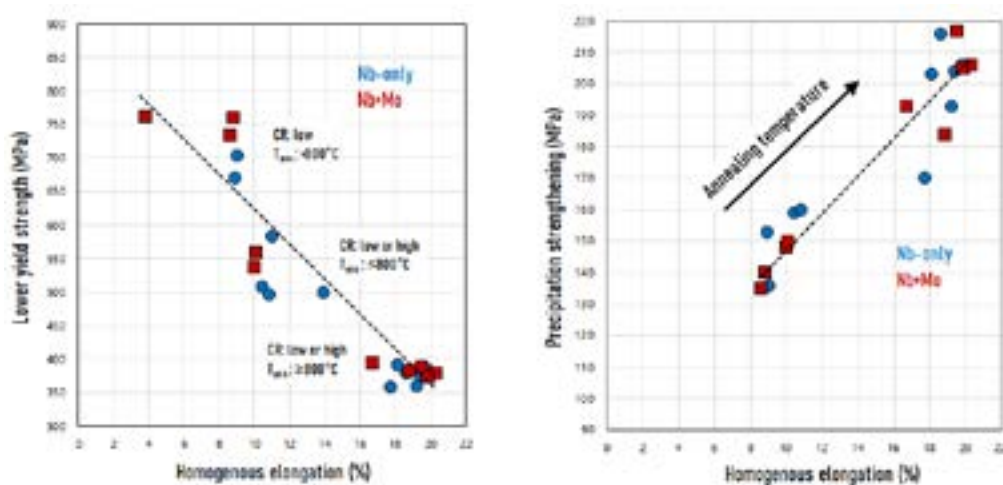


Figure 12 - Tensile Properties and precipitation strengthening corrections with Cold Rolled Reduction and different annealing temperatures on Low carbon Nb and Nb-Mo microalloyed steel

HSLA ACHIEVED UNDER FULL SCALE PRODUCTION CONDITIONS.

Industrial development of Super-HSLA steels allow yield strength range of 550 – 800 MPa and tensile strength up to 850 MPa with balance of strength, global formability and local formability can be reached using adequate cold process parameters.

The Alloy concept of Super HSLA Steels is typically extra-low carbon ($C < 0.05\%$), Nb or Nb+Mo microalloyed.

The New HSLA Grades is competing with DP590 and DP780 with some advantages. The microstructure is fine-grained ferrite with low volume fraction of pearlite and pronounced Nano-Carbide precipitation promoting a fine and homogeneous microstructure with a high degree of isotropy in tensile properties and excellent local formability with Yield-to-tensile ratio typically $>80\%$ and the weld peak hardness $<350 \text{ HV}_{10\text{Kg}}$ [5].

The Figure 13 shows the typically engendering stress vs. strain curves of Super HSLA Steels [5].

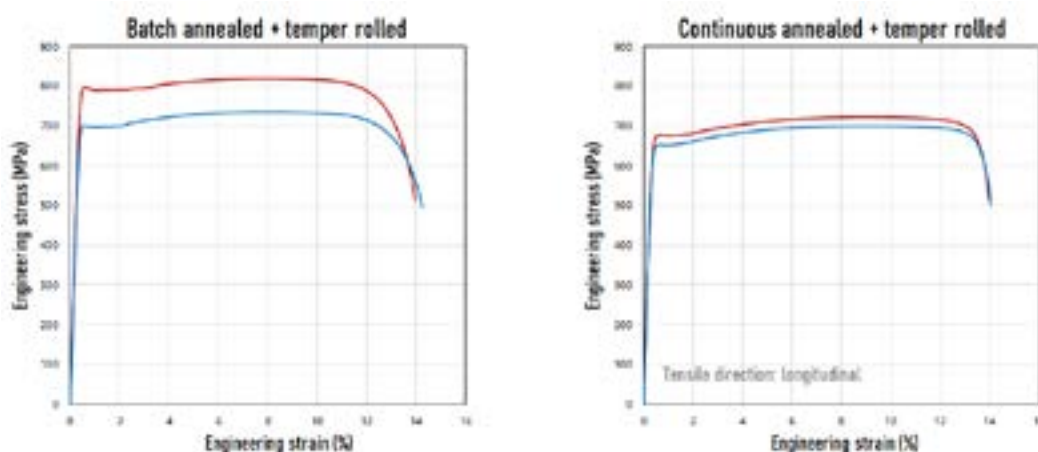


Figure 13 - Typically engendering stress vs. strain curves of Super HSLA Steels[5]

The Figure 14 shows the current Super HSLA Steels, Nb and Nb-Mo microalloyed, industrial trials with Yield Strength 650MPa and higher with annealing temperature 700 to 900 °C compering especially with DP 590 and DP780 [5].

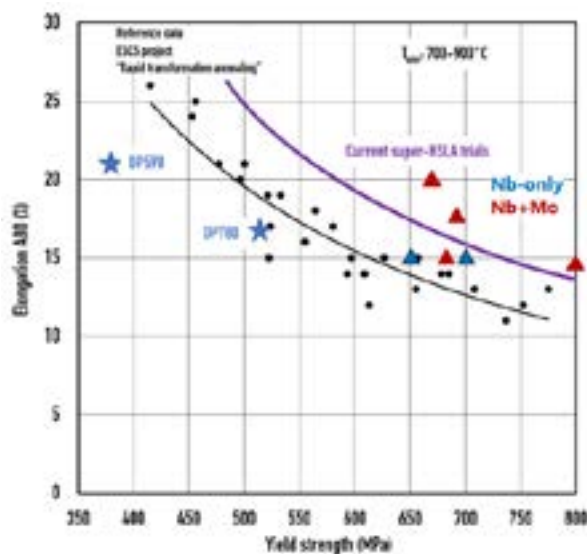


Figure 14 - Current Industrial Trials of Super HSLA Steels [5].

INDUSTRIAL PRODUCTION SCENARIOS

The current Super HSLA Steels, Nb and Nb-Mo microalloyed, industrial tria has Extremely wide variety of production routes with no special equipment needed, adaptable to regional markets, optimum use of production resources and excellent affordable cost. The Figure 15 shows the production scenarios of Super HSLA industrial Production[5].

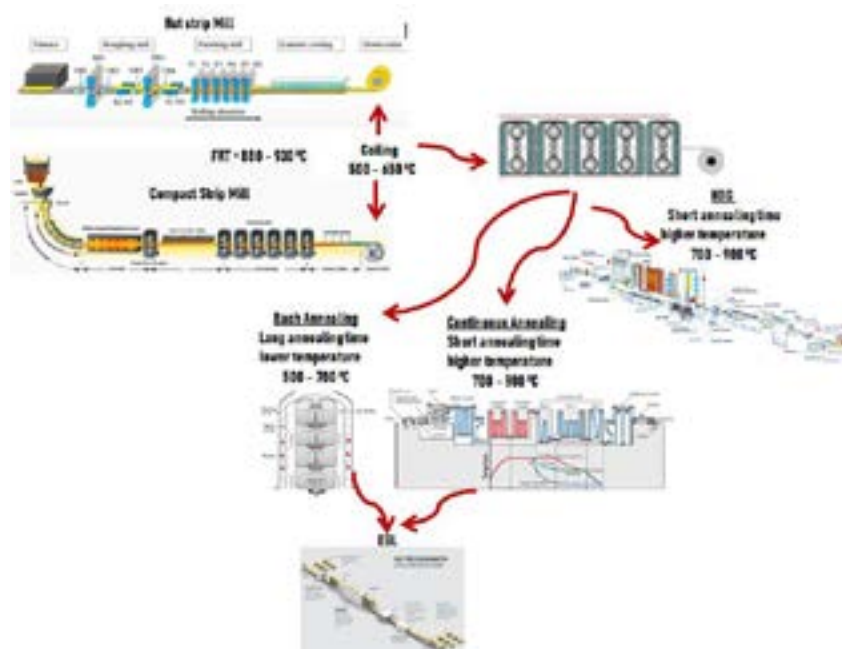


Figure 15 - Production scenarios of Super HSLA industrial Production [5].

FINAL REMARKS AND CONCLUSIONS

Hot Rolled High Strength Low Alloy (HSLA) Steels up 700 and 960 MPa have been word wide applied on the commercial vehicles promoting weight and emission reduction and also improving weldability and durability. The HSLA cold rolled, in despite of its importance during the 1980's, these steel grades lost its leadership for AHSS promoting mainly by WorldAutoSteel Program started in 1990's.

The AHSS and more recently the 3a Generation and 2nd Generation Steels it is options by OEM's for structural projects of passenger vehicles and the HSLA cold rolled steel grades are decreasing its market share on the Body-in-white.

Current cold-rolled HSLA steels are strength limited but display favorable combinations of global and local formability. Conversely, high strength-ductility combinations in AHSS suffer from low and unpredictable local formability in addition to joining challenges as carbon content is increased.

Super HSLA Steels Cold Rolled, typically extra-low carbon ($C < 0.05\%$), Nb or Nb-Mo microalloyed, with right process strategy can produce higher strength grades. Successful production of cold rolled HSLA steel with Yield Strength > 550 MPa, even the appropriate steel composition, needs combination an adequate hot rolled process, amount of cold reduction and annealing cycle.

Using this strategy production Super HSLA Steels with yield strenght upper 550 MPa is possible to achieve partial replacement of DP590 or DP780 steels in selected application wherein global and local formability is required with affordable cost.

These recent developments showed for automotive segment a new option for Body-in-White structures and motivated the OEM's to include Super HSLA Steels in its technical specifications. With this movement, we can predict the recovery of the HSLA Steels importance on automotive segment, as already registered in the past.

REFERENCES

- [1] Innovative manufacturing technology enabling light weighting with steel in commercial vehicles
Hardy Mohrbacher • Marius Spöttl • Jesse Paegl
- [2] Light weighting opportunities and material choice for commercial vehicle frame structures from a design point of view. Peter Seyfried • Ed Juarez Mendes Taiss • Alexandre Costa Calijorne • Fei-Peng Li • Qi-Feng Song.
- [3] An analysis of strengthening mechanisms of TMCP-HSLA steels Frátrik M. • Mičian M. • Winczek J.
- [4] Maximizing Strengthening Mechanisms in Continuously Annealed HSLA Steel. C.M. Enloe • F. D’Aiuto • H. Mohrbacher.
- [5] Advanced HSLA – High Strength Low Alloy Steels for Automotive Application – Presentation on Material in CarBody Engineering - .M. Enloe • F. D’Aiuto • H. Mohrbacher.
- [6] Principal effects of Mo in HSLA steels and cross effects with microalloying elements for International Seminar in Applications of Mo in Steels. H. Mohrbacher.
- [7] Advances in Steels for Automotive Application Niobium Improving Steel Performance – Presentation on Institute of Technological Research of São Paulo (IPT) 1st Seminar on Forming and Application of High Performance Steels. Ed Juarez Mendes Taiss.
- [8] Increasing Transportation Efficiency by Using High Strength Niobium Microalloyed Steel for Dump Trucks – Presentation on International Seminar on Application of High Strength Steels in Lightweight Commercial Vehicles – Beijing, China. Ed Juarez Mendes Taiss • Alexandre Costa Calijorne.



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil
26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG
25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental
Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

Preform optimization for manufacturing process of metal-polymer components through hybrid forming

Alba, Diego R. ⁽¹⁾
Weiß, Alexander ⁽²⁾
Liewald, Mathias ⁽³⁾

ABSTRACT

Enhancing efficiency within sectors like automotive involves tailoring the properties of components. An effective approach to these challenges involves hybrid components, e.g. plastic-metal composites, which leverage diverse material properties. This study delves into numerical investigations centered on the utilization of plastics as an active medium for forming metallic materials. Numerous challenges arise in this processing method, encompassing factors like polymer's pressure resistance and the alignment of introduced reinforcement fibers. Another critical aspect is the dissimilar elastic behavior of the two materials, significantly impacting the strength of the composite and its bonding. Drawing upon prior research involving material selection and characterization, this paper pursues the optimization of die filling through Design of Experiments (DoE) techniques. The study employs a Response Surface Methodology, utilizing numerical analysis to refine the metallic outer ring preform. Central to the analysis is comprehending ability of polymers to form the metallic material and demonstrating the feasibility of producing a hybrid component. To illustrate, an exemplar hybrid component is presented: a spur gear featuring a polymeric core comprising glass fiber reinforced polypropylene, accompanied by an aluminum alloy AA6082 outer geometry.

Key words — Hybrid Forming, Polymeric-metallic components, numerical simulation, Response Surface Methodology.

1 Introduction

Sustainability is a concerning topic among all industrial sectors. In order to succeed, companies will need to address new challenges and opportunities, and concurrently, accelerate the pace in which products are developed and released. Among the 17 Sustainable Development Goals defined by the

⁽¹⁾ M.Sc. Engineer, Institute of Metal Forming Technology, University of Stuttgart, Germany

⁽²⁾ M.Sc. Engineer, Institute of Metal Forming Technology, University of Stuttgart, Germany

⁽³⁾ Prof. Dr-Ing., Institute of Metal Forming Technology, University of Stuttgart, Germany

United Nations Department of Economic and Social Affairs, lightweight design supports seven [1-2]. Therefore, lightweight design is an essential aspect of sustainability. In the context of lightweight design, the utilization of polymer gears is constantly expanding their applications areas.

The application of polymer gears is predominantly for transmission systems of electric brakes, electric steering systems, gear pumps and powertrain of electric two-wheelers, e.g. e-bikes (Figure 1a). Recently, the usage of polymer components in the gearbox of a small urban electric vehicle such as the Renault Twizy was proposed (Figure 1b), in which the power transmission requirements are lower compared to other electric cars [3].

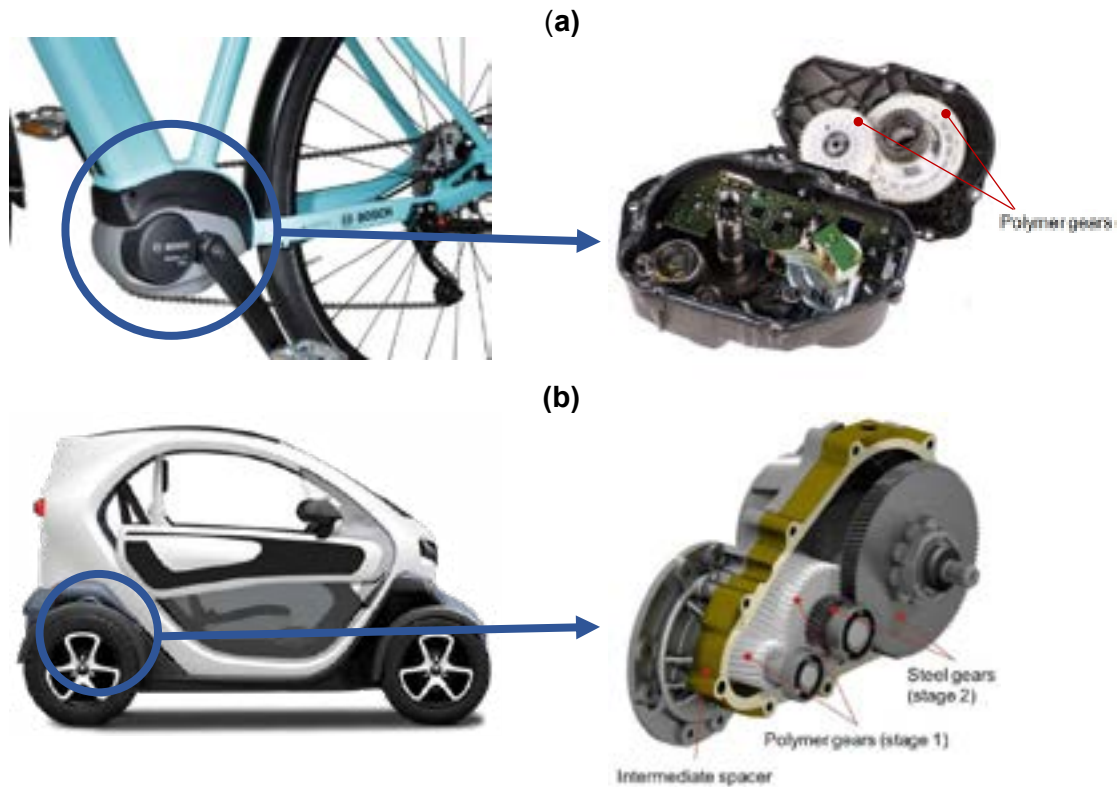


Figure 1: Examples of current and future applications of polymer gears in e-mobility: (a) transmission system of an e-bike; (b) gearbox of a small urban electric vehicle [3].

Among several advantages in the use of polymers, it is possible to cite good damping properties, light weight and corrosion resistance. However, there are also certain disadvantages, such as lower mechanical strength and lower stiffness compared to metallic materials. Furthermore, the material has limitations regarding the operational temperature. Moreover, according to VDI 2736 standard, polymer gears present similar damage behavior as steel ones and among several damage types tooth root breakage (Figure 2a and b), wear and plastic deformation must be highlighted as relevant ones. In summary, there are still major challenges regarding polymer gears.

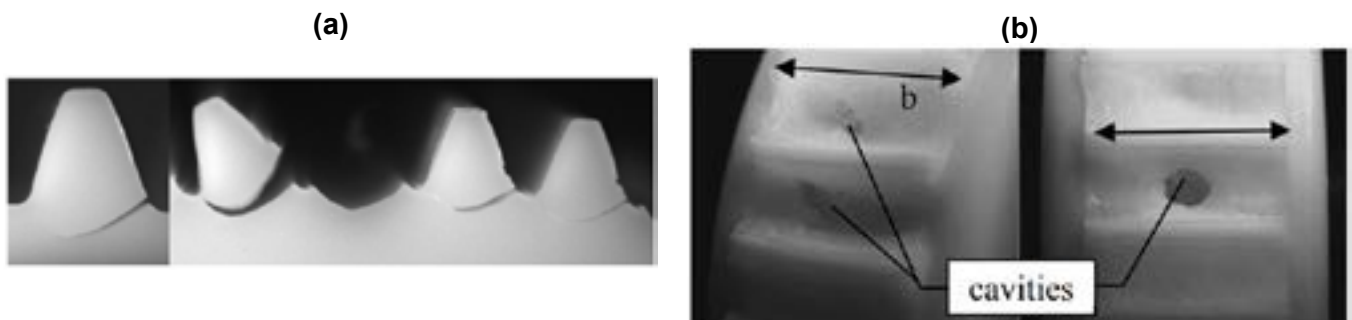


Figure 2: (a) Tooth root breakage failure of polymers gears; (b) Cavities in tooth root breakage area of polymers gears [4].

To address these challenges, a new concept for manufacturing of hybrid gears is proposed within this study. Since wear and tooth root breakage are common failure modes for such polymer gears, the

hypothesis of a metallic contact between the gear's teeth is assumed to reduce such drawbacks. Therefore, this new manufacturing method proposes the use of polymers in solid phase as an active medium for metal forming while the polymer remains in the formed part. The chosen demonstrative geometry for this component is a spur gear with a polymeric core made of glass fiber reinforced polypropylene and an outer geometry made of the aluminum alloy AA6082 (Figure 3a). The schematic tool concept before and after the forming process is presented in Figure 3b.

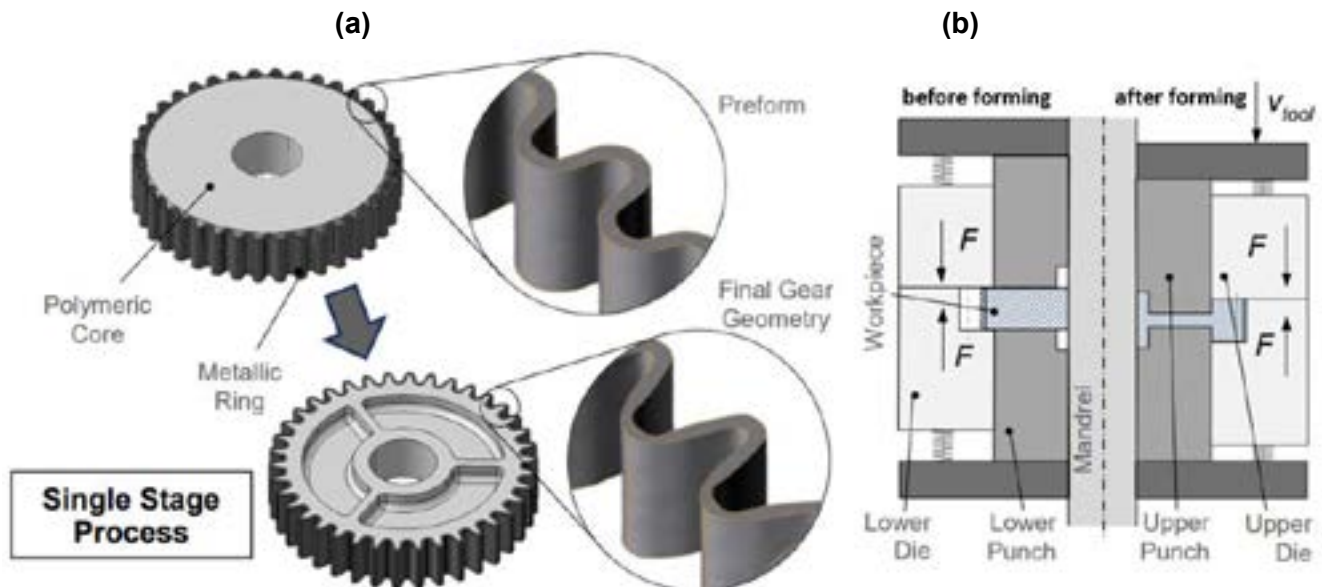


Figure 3: Process principle for hybrid manufacturing of spur gear. (a) Billet materials and targeted component; (b) schematic tool concept before and after forming.

In this context, numerous studies are available addressing the topic of joining by forming [5] or joining by plastic deformations techniques and hybrid manufacturing [7, 9]. Further, different processes and tool concepts for joining by forming technologies have been investigated [6]. Moreover, the utilization of mechanical joining techniques is a promising method to manufacture hybrid components with tailored properties made by polymer and metals [8].

Regarding joining of polymers and metals, several processing techniques are available, such as friction riveting [10], clinching, non-adhesive form-lock joints, pin and loop joining [11], assembly injection molding [12], in-mold forming [13], combined sheet metal forming and injection molding [14], forming with polymers as active medium [15] or injection molding and deep drawing [16]. However, for the production of such hybrid components several challenges arise. For instance, the dissimilar chemical and physical properties, e.g. Young Modulus and thermal expansion coefficients, from the materials could interfere on the springback effect after forming which could be detrimental for the joint strength. Moreover, the necessary forming pressures to form the metallic material could be very high if the forming of bulk materials is considered. Consequently, these limitations directly interfere with the geometrical complexity of the manufactured component.

In this work, a numerical investigation for the determination of the most suitable metallic preform geometry in terms of the highest possible die filling was conducted. In particular, a Box-Behnken DoE was used and a Response Surface Methodology was applied to optimize the metallic outer ring preform geometry through the numerical analysis.

2 Methodology

In order to optimize the preform geometry for this process, a finite element method (FEM) simulation using DEFORM 3D software was conducted to investigate the forming process of a spur gear. The target geometry was a gear wheel comprising a module of 3, 28 teeth and a tooth width of 15 mm. The forming process involved two deformable objects, namely a polymeric inner billet and a metallic outer ring. To decrease computational effort, symmetry planes were employed and the simulated section focused on half of a tooth, representing an angle of 6.4287° . The flow curve of the polymeric material was based on a previous study [17] and the flow curve for the metallic outer ring made of AA6082 was taken from the software library. Tetrahedral elements were employed as the element type for the simulation, with a total

of 72000 elements used for the polymeric billet and 84000 elements used for the metallic ring. Mesh windows were used to refine the FE mesh in the contact area of the two deformable objects. The smallest edge length of the mesh elements was 0.2 mm. The friction between the bodies was modeled using the Tresca model with a constant friction coefficient of $m = 0.12$. The tool velocity during the forming process was set to a constant value of 20 mm/s, while the ambient temperature was maintained at 20°C. Heat conduction was accounted with a thermal conductivity value of 11000 W/m²*K and heat convection was included with a heat transfer coefficient of 11 W/m²*K. Figure 4a presents the FEM model, while Figure 4b shows an example of the metallic outer ring geometry.

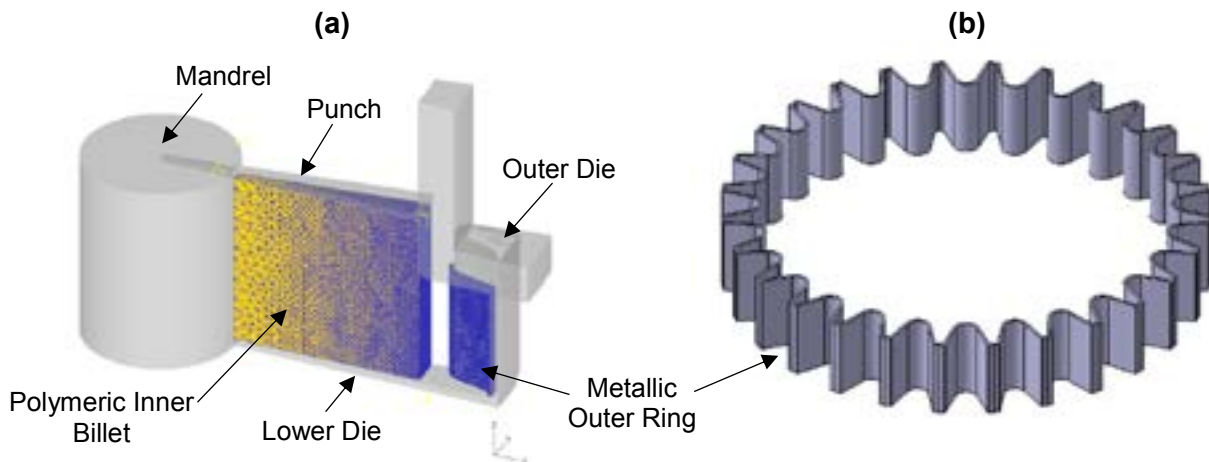


Figure 4. (a) FEM model for hybrid forming process for a spur gear; (b) Metallic outer ring geometry for optimization analysis of die filling during *tandem* forming.

In the context of design of experiments, the Box-Behnken Design (BBD) was first proposed by Box and Behnken [16] and became a useful design of experiments with Response Surface Methodology (RSM) for industrial process development and optimization as well as product design. BBD is a convenient method for developing second-order response surface models [18, 19]. Box–Behnken designs constitute an alternative to central composite designs. They are a class of rotatable or nearly rotatable second-order designs based on three-level incomplete factorial designs [20, 21]. The use of BBD is widespread in industrial research because of its cost-effectiveness, since it requires only three levels for each factor. Another advantage is that it does not contain combinations where all the factors are in the highest or lowest levels. In this way, the experiments are not carried out under extreme conditions.

One of the main objectives of the BBD method is the determination of the optimum settings of the controlled factors that result in a maximum (or minimum) response over the experimented region. This requires a good fit of the proposed model and the experimental values. To verify the adequacy of the model the coefficient of determination R^2 was evaluated. The closer this coefficient is to a value of 1, the better is the adequacy of the model. The R^2 value provides a measure of variability in the observed response values and can be explained by the factors and their interactions.

Further, ANOVA is a statistical tool to test the equality of several population means, i.e. investigate the degree of difference or similarity between two or more groups of data. It employs sum of squares and F statistics to predict the fit of the model and also to discover the significance of each factor for the response. One of the main reasons to perform an ANOVA is to understand which factors and interactions between them are more relevant to the process. The criteria followed in this technique is that if the calculated value of F-ratio in the regression model is higher compared to the standard value specified on the F-table for the 95% confidence level, the interaction is considered relevant and adequate within the confidence limit. To avoid the necessity to compare the F-value calculated with the F-value from the table, the p-value is analyzed. For this p-value, if its value is below 0.05 (or 95% confidence level), the interaction is considered relevant.

As last step, fitting a second-order model to the response variable(s) of interest is an integral aspect of RSM. The method of least squares is usually utilized to estimate the regression coefficients [20, 22]. Modelling is usually done by fitting simple models (linear or quadratic, as a rule) to response values obtained from standard or augmented factorial designs. The use of well-structured optimization procedures to improve a certain process serves to reduce time and the number of experiments needed.

A search for significant effects of the various factors on quality parameters is demanding. In this context, BBD followed by RSM is a tool that helps to estimate the influence of variables on the process. Furthermore, this method is useful to optimize the design (i.e., geometry, mechanical properties, etc.) in order to obtain an improved (variable response) product or process.

For this study, three factors named outer ring preform thickness (t [mm]), outer ring preform radius (R [mm]) and ring-to-die offset (os [mm]) were varied based on previously executed studies [17]. Table 1 shows each analyzed factor as well as the evaluated levels, while Figure 5 shows a schematic figure of just one outer ring preform tooth geometry with the designated varied factors. For the statistical analysis, Minitab software was used.

Table 1: Outer Ring Preform dimensions for hybrid forming of a spur gear; with levels for analysis.

Factor		Level		
Independent Variables [mm]	Notation	-1 (Low)	0 (Center)	+1 (High)
Outer Ring Preform thickness	t	0.4	0.8	1.2
Outer Ring Preform radius	R	1.9	2.0	2.1
Ring-to-die offset	os	0.1	0.6	1.1

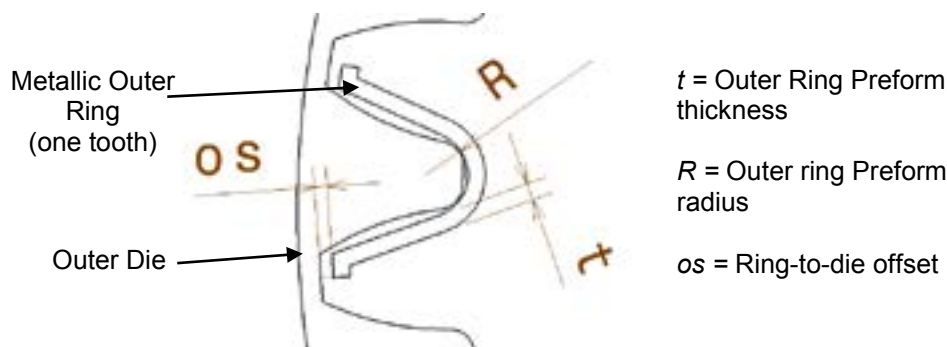


Figure 5: One tooth of Outer Ring Preform Geometry showing the varied parameters of this study.

The analyzed response was the unfilled area on the region between the metallic outer ring and the die cavity. Figure 6 shows an example of the unfilled area.

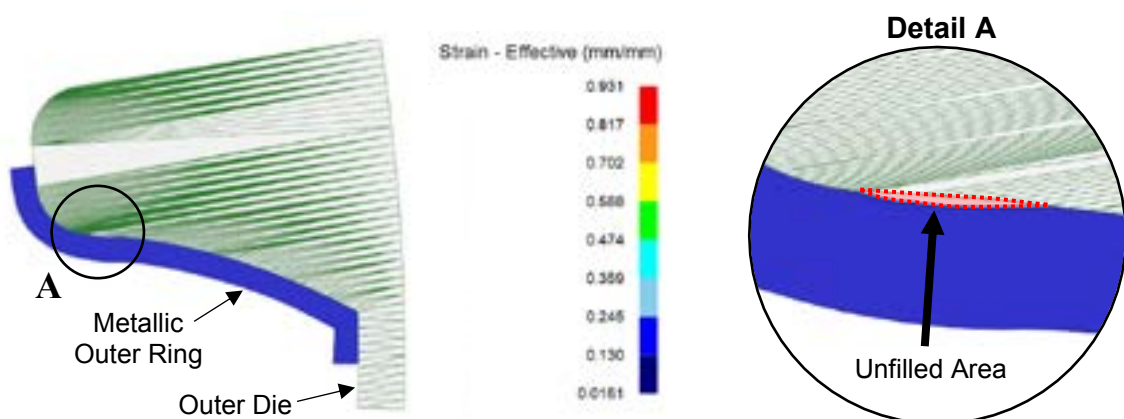


Figure 6. FEM model for the optimized outer ring geometry at the end of the process; Detail A presents the unfilled area (red dotted line).

3 Results & Discussions

Numerical simulations were performed in order to optimize the preform geometry of the outer metallic ring during the hybrid forming of a spur gear. Figure 7 presents an overview of the numerical results for the hybrid component for the simulation run thirteen. All the other twelve simulations showed a similar behavior whereas

Figure 8 presents two opposite cases regarding the analyzed response showing a low value for unfilled area (

Figure 8a) and a high value of unfilled area (

Figure 8b).

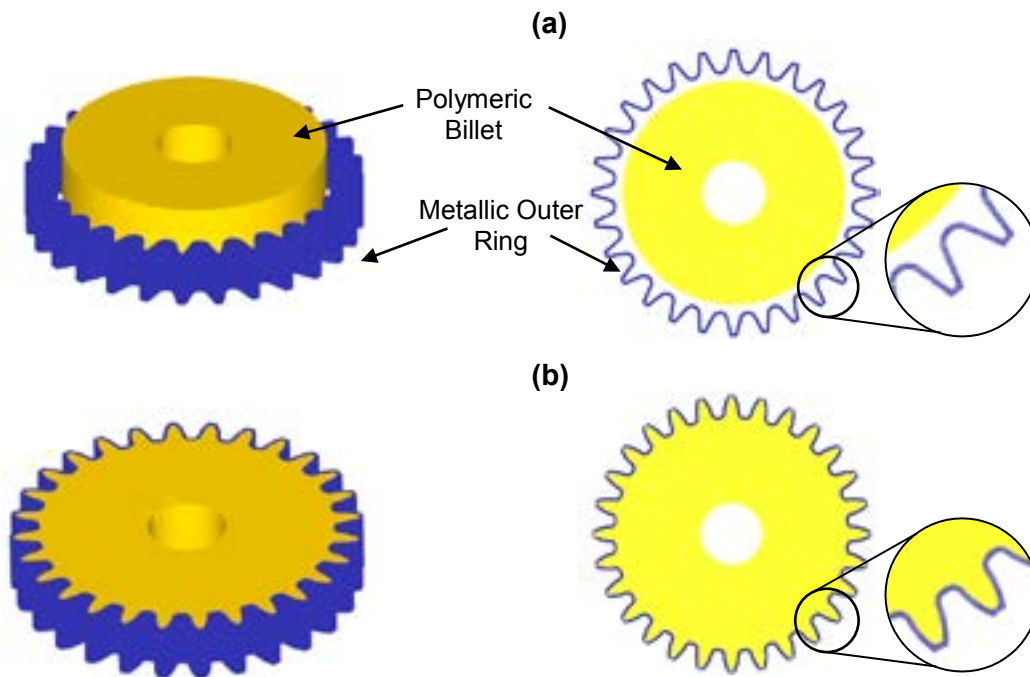


Figure 7: FEM simulation for hybrid forming process: (a) before forming process; (b) after forming process.

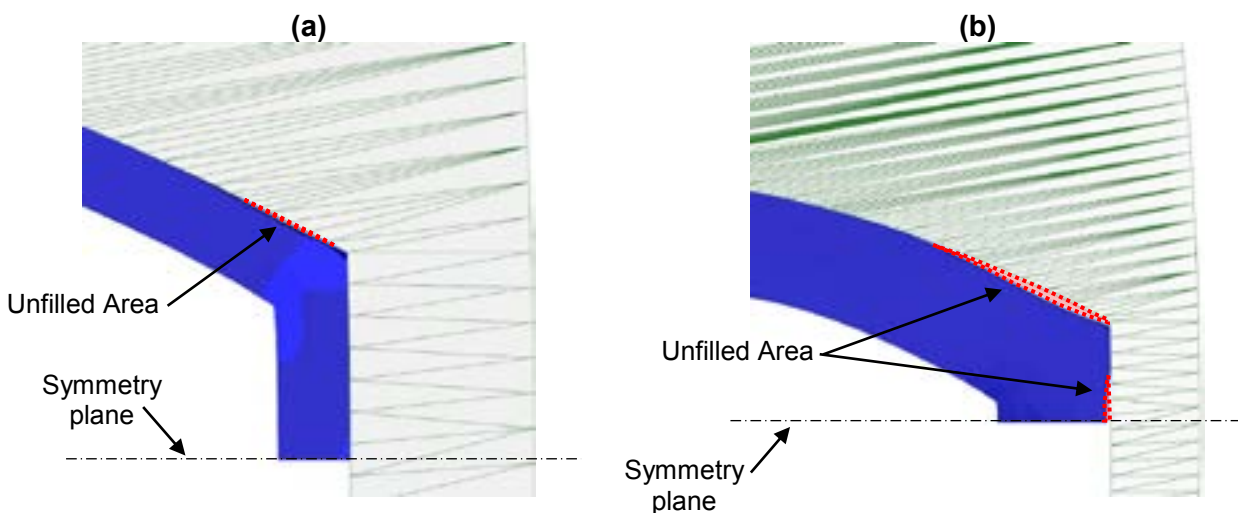


Figure 8: Analyzed response (unfilled area) for two opposite results simulated cases; (a) Run 5: low unfilled area; and (b) Run 4: high unfilled area - see Table 2.

In relation to the die filling analysis, the results of the thirteen runs required for the BBD of three factors are shown in Table 2, as well as the geometric notation for the design of experiments. The evaluated response variable (unfilled area), as presented in Figure 8, is also given in the table.

Table 2: Design matrix for analysis and results of unfilled area.

Run	Standardized Coded Factor			Outer Ring Preform thickness [mm]	Outer Ring Preform Radius [mm]	Ring-to-die offset [mm]	Unfilled Area [mm ²]
1	-1	-1	0	0.4	1.9	0.6	0.0265
2	-1	1	0	1.2	1.9	0.6	0.1395
3	1	-1	0	0.4	2.1	0.6	0.0185
4	1	1	0	1.2	2.1	0.6	0.1890
5	0	-1	-1	0.4	2	0.1	0.0120
6	0	1	-1	1.2	2	0.1	0.1005
7	0	-1	1	0.4	2	1.1	0.0490
8	0	1	1	1.2	2	1.1	0.1100
9	-1	0	-1	0.8	1.9	0.1	0.0415
10	1	0	-1	0.8	2.1	0.1	0.0585
11	-1	0	1	0.8	1.9	1.1	0.0450
12	1	0	1	0.8	2.1	1.1	0.0630
13	0	0	0	0.8	2	0.6	0.0565

The unfilled area was concentrated mainly on the region shown by Figure 8. From the results in Table 2 it can be seen that the variation of unfilled area is in a range of 0.1770 mm², with 30% (4 of 13) of the runs resulting in values above 0.1 mm², and 70% (9 of 13) reaching less than 0.1 mm².

Based on the obtained values, a second-order (or regression) model for predicting the unfilled area was derived. For this set of experiments, the calculated value of R² was 0.9231. It can therefore be concluded that 92,31% of the observed variability in the unfilled area could be explained by the independent variables. Table 3 shows the ANOVA of the performed numerical investigations.

Table 3: ANOVA table for unfilled area response showing the values used to analyze the relevance of each factor and to define a regression analysis for the outer ring preform optimization of hybrid forming of a spur gear.

Factor (Source)	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value
Model	9	0.029237	0.003249	4.00	0.141
Linear	3	0.024539	0.008180	10.08	0.045
t	1	0.023436	0.023436	28.87	0.013
R	1	0.000732	0.000732	0.90	0.412
os	1	0.000371	0.000371	0.46	0.547
Square	3	0.003682	0.001227	1.51	0.371
t*t	1	0.001590	0.001590	1.96	0.256
R*R	1	0.000252	0.000252	0.31	0.616
os*os	1	0.000514	0.000514	0.63	0.484
2-Way Interaction	3	0.001016	0.000339	0.42	0.754
t*R	1	0.000827	0.000827	1.02	0.387
t*os	1	0.000189	0.000189	0.23	0.662
R*os	1	0.000000	0.000000	0.00	0.987
Error	3	0.002435	0.000812		
Total	12	0.031672			

By analyzing ANOVA (see Table 3), and furthermore in the pareto chart (see Figure 9), the Outer Ring Preform thickness was the most significant factor. By decreasing this factor, it is possible to decrease the unfilled area within the investigated parameter range. The linear and quadratic terms of the Outer Ring Preform thickness (contribution of 79.01%) have a significant effect on unfilled area, while the other factors and their interactions have no significant effect on the response evaluated (their total contribution is 9.11%).

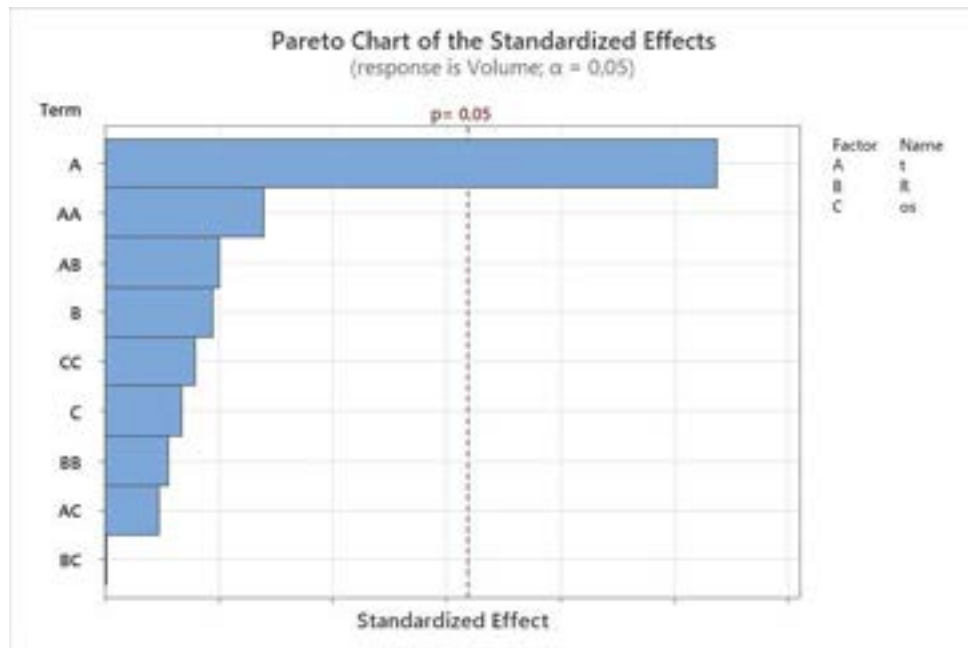


Figure 9: Pareto chart of the standardized effects; variable: unfilled area [mm²].

A mathematical model called a regression model characterizes the relationship between the independent variables and response. Based on the above analysis, it is possible to obtain a model to predict unfilled area over the experimental region. Furthermore, a regression analysis was performed to fit the response variable. The resulting second order polynomial equation, adjusted at 95% of confidence level, represents response variables as functions of Outer Ring thickness, Outer Ring Radius and Ring-to-die offset parameter. Equation 1 can express an empirical relationship between the response and the input test variables.

$$UA = 4.60 - 0.827 \cdot t - 4.39 \cdot R + 0.103 \cdot os + 0.165 \cdot t^2 + 1.05 \cdot R^2 - 0.0600 \cdot os^2 + 0.359 \cdot t \cdot R - 0.0344 \cdot t \cdot os + 0.005 \cdot R \cdot os \quad (1)$$

Where: UA = unfilled area [mm²], t = Outer Ring Preform thickness [mm], R = Outer Ring Preform Radius [mm] and os = Ring-to-die offset [mm].

Based on the regression equation, the three-dimensional surface plots for the response in terms of the process variables thickness and radius are shown in Figure 10 for different ring-to-die offset values. The ring-to-die offset parameter was kept constant during the plots since it was the process parameter with least influence on the response during the experiments. The optimum is very near to low thickness values and to a radius dimension around the 2 mm value. From examination of these plots, it is clear that the process is more sensitive to changes in thickness compared to changes in the radius dimension. Therefore, based on the presented results, it is possible to indicate that the optimal parameter set for this study is $t = 0.4$ mm; $R = 2.02323$ mm and $os = 0.1$ mm, which would result in nearly no measurable unfilled volume.

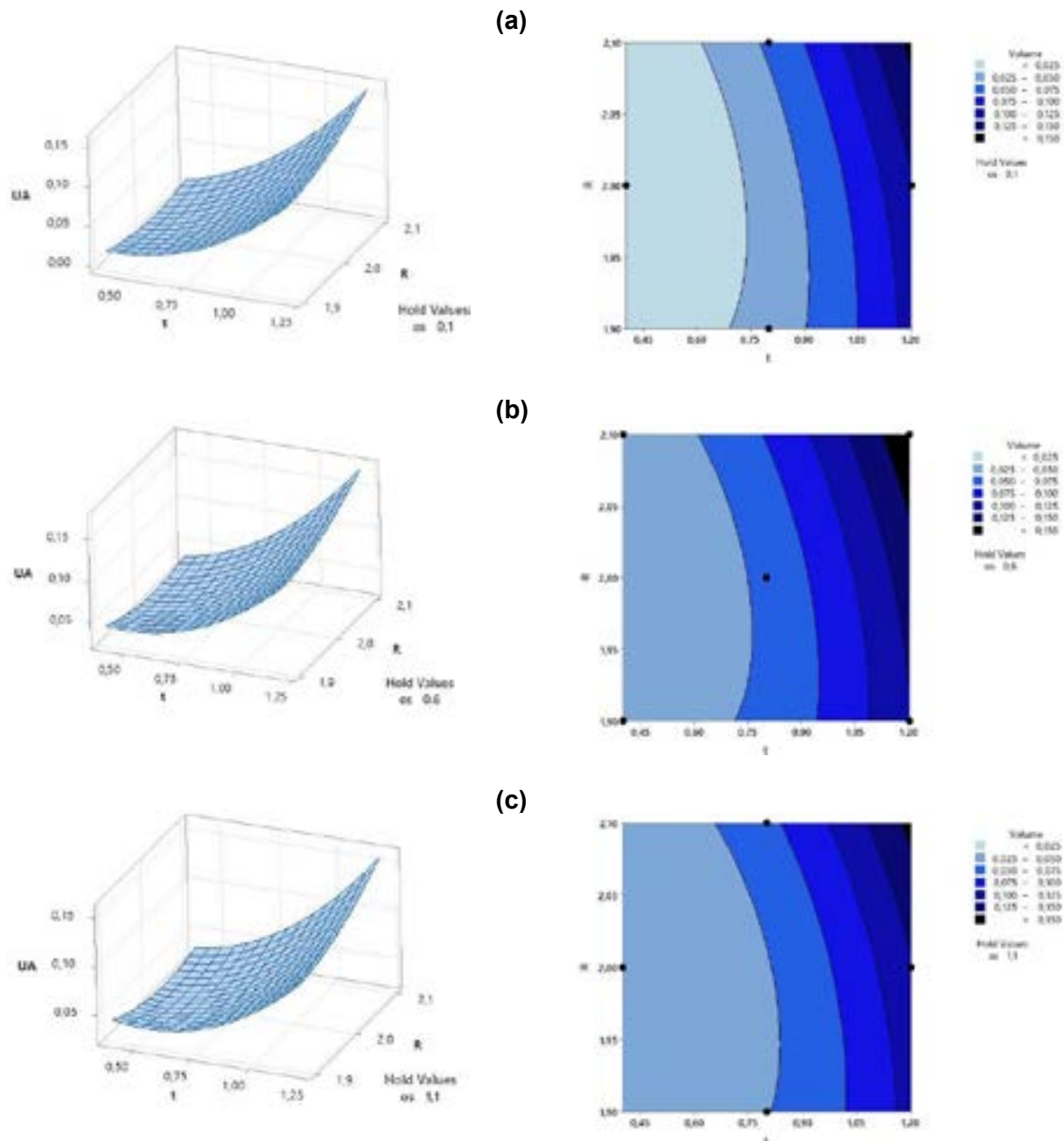


Figure 10: 3D and 2D Surface plots for the response (unfilled area) in terms of the dimensional variables thickness $[t]$ and radius $[R]$ for different hold values for ring-to-die offset parameter $[os]$. (a) Hold value of $os = 0.1$ mm; (b) Hold value of $os = 0.6$ mm; (c) Hold value of $os = 1.1$ mm.

According to the model's prediction, response values below to zero are theoretical possible, although such results are impossible to be achieved. As previously described, the prediction of the model fits the measured values for the calculated regression equation. Due to the variance and error of the model it is not possible to ensure that such results are possible to be achieved but at least it is shown that this is the optimized area of the investigated parameter window.

Furthermore, in addition to the verification through ANOVA, the regression model could be validated by a numerical simulation with an optimized new set of parameters. Based on the above presented results – and aiming to further experimental validation - the chosen geometrical parameters for validation are presented in Table 4 and arise from Figure 10.

Table 4: Optimized parameter set of the outer ring preform for posterior experimental tests.

Factor	Level	
Independent Variables [mm]	Notation	
Outer Ring Preform thickness	t	0.4
Outer Ring Preform radius	R	2.0
Ring-to-die offset	os	0.1

This set of parameters are the same as the Run 5 (Table 2), and presented a value of 0.0120 mm² of unfilled area. Therefore, based on the proposed analysis from this study, this is the dimensions for the metallic outer ring that should be considered in order to achieve a process with the most advantageous filling of the die cavities.

4 Conclusions & Outlook

Box-Behnken design and Response Surface Methodology was applied successfully for optimization, through FEM analysis, of the Metallic Outer Ring Preform Geometry of the hybrid manufacturing process of composite spur gear made of polymer and metal. The following conclusions can be drawn from this study.

- Based on the FEM results, the proposed manufacturing route for a hybrid spur gear is feasible.
- The metallic outer ring geometry plays a decisive role on the successfulness of the hybrid forming process for the example of a spur gear.
- The unfilled area of the die cavities for the proposed component could be estimated by the application of a second order regression model. The proposed regression model presented a good fit regarding the simulation results.
- The optimized set of parameters in order to achieve the lowest possible result for unfilled area is $t = 0.4$ mm; $R = 2.02323$ mm and $os = 0.1$ mm; where t = Outer Ring Preform thickness [mm], R = Outer Ring Preform Radius [mm] and os = Ring-to-die offset [mm].
- Outer ring preform thickness represents an influence of 79% on the analysed response – unfilled area – followed by the outer ring preform radius and lastly ring-to-die offset parameter.
- Further studies regarding the joint pressure and joint strength of the polymer and metal must be made in order to promote a reliable connection.

ACKNOWLEDGMENT

The research project “Hybridmassivumformung von Kunststoff-Metall-Verbunden” (Project n°: 461883580) in cooperation with the Institut für Kunststofftechnik of the University of Stuttgart is funded by the German Research Foundation (DFG). The authors would like to thank the German Research Foundation for the financial support.



REFERENCES

1. <https://sdgs.un.org/goals> access on 19.09.2023
2. <https://www.leichtbauwelt.de/leichtbau-trifft-nachhaltigkeit-wie-leicht-ist-nachhaltig/> access on 19.09.2023
3. Reitschuster, S., et al.: *Application of high-performance polymer gears in light urban electric vehicle powertrains*. Forsch Ingenieurwes, 88, 683-691 (2022).
4. Hasl, C., et al: *Potential of oil-lubricated cylindrical plastic gear*. Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 12, 1-9, (2018)
5. Groche, P., et al.: *Joining by Forming – A review on joint mechanisms, applications and future trends*. Journal of Materials Processing Technology, 214, 1972-1994 (2014).
6. Salamati, M., et al.: *Processing and tooling considerations in joining by forming technologies; part A – mechanical joining*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 101, 261-315 (2019).

7. Meschut, G.; et al.: *Review on mechanical joining by plastic deformation*. Journal of Advanced Joining Process, 5, 100113, 1-27 (2022).
8. Weber, F.; et al.: *Joining by forming – a selective review*. Journal of Advanced Joining Process, 3, 1000054, 1-18 (2021).
9. Mori, K.; et al.: *Joining by plastic deformation*. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 62, 673-694 (2013).
10. Sankaranarayanan, R.; et al.: *Review of Research on Friction Riveting of Polymer/Metal Light Weight Multi-Material Structures*. Trans Indian Inst Met, 74(11), 2541-2553 (2021).
11. Galinska, A.; Galinski, C.: *Mechanical Joining of Fibre Reinforced Polymer Composites to Metals—A Review. Part II: Riveting, Clinching, Non-Adhesive Form-Locked Joints, Pin and Loop Joining*. Polymers, 12, 1681, 1-40 (2020).
12. Schmachtenberg, E.; Schuck, M.; Kühnert, I.: *Urformen und Montieren in einem Prozess*. In: Kunststoffe, 4, 24–31 (2007).
13. Müller, T.: *Methodik zur Entwicklung von Hybridstrukturen auf Basis faserverstärkter Thermoplaste*. Erlangen, Universität, Lehrstuhl für Kunststofftechnik, Diss., (2011).
14. Rauscher, B.: *Formschlüssig verbundene Metall-Kunststoff-Hybridbauteile durch Integration von Blechumformung und Spritzgießen*. Dissertation, TU Dortmund University (2011).
15. Hussain, M.M.; Rauscher, B.; Tekkaya, A.E.: *Wirkmedienbasierte Herstellung hybrider Metall-Kunststoff-Verbundbauteile mit Kunststoffschmelzen als Druckmedium*. In: Mat. wiss. u. Werkstofftech. 9, 627-632 (2008).
16. Michaeli, W.; Mäsing, R.: *Metalldekorierte Bauteile in einem Schritt – Hinterspritzen und integriertes Tiefziehen*. DIF-Tagung „Kunststoff-Metall-Verbundtechnik“, 9./10. März 2010, Bad Herrenalb, S. 1-16 (2010).
17. Alba, D.R.; Reitingner, P.; Ebert, C.; Bonten, C.; Liewald, M.: *Studies on manufacturing polymer-metal hybrid components through integrated bulk forming*. WGP-Jahreskongress 2023, Freundenstadt - Germany, (2023).
18. Box, G.E.; Behnken, D.W.: *Some new three level designs for the study of quantitative variables*. Technometrics, 2(4), 455-475 (1960).
19. Ferreira, S.C., et al.: *Box-Behnken design: an alternative for the optimization of analytical methods*. Analytica chimica acta. 597(2),179-186, (2007).
20. Montgomery, D.C.: *Design and Analysis of Experiments*. 3 ed. John Wiley & Sons, (1991).
21. Box, G.E.; Draper, N.R.: *Empirical model-building and response surfaces*. Wiley New York, Vol. 424, (1987).
22. Myers, R.H.; Montgomery, D.C.; Anderson-Cook, C.M.: *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. Wiley, 3rd ed. (2011).

AVALIAÇÃO DO LIMITE DE CONFORMAÇÃO DE AÇOS AVANÇADOS DE ALTA RESISTÊNCIA A PARTIR DE ANÁLISE DIC E LIMITE DE ESTRICÇÃO

Cruz. Murilo N. (1)
Chemin Filho. Ravilson A. (2)
Marcondes. Paulo V. P. (3)

RESUMO

A indústria automotiva assim como a indústria de produtos de linha-branca são grandes consumidores de peças estampadas e estão sempre em busca de melhorias de processos visando produtos mais eficientes. Para atingir tal eficiência seja em maior resistência ou menores pesos e gastos com materiais, essas indústrias estão em busca de aços avançados que possuem essas propriedades desejáveis. O foco em melhor conformabilidade nos aços avançados é essencial para atingir essas novas necessidades dos consumidores destas peças. Comumente é utilizado fatores que quantificam a conformabilidade do material, como a CLC (Curva Limite de Conformação) que vários autores utilizam de métodos tradicionais como Nakazima para executar. Entender e explorar as variáveis do ferramental e possíveis ganhos são essenciais visto que a utilização destes aços especializados ainda não em larga escala. Para entender melhor a utilização destes aços nos processos tendo em vista um cenário mais real, o entendimento de características do material como determinação do ponto de estrição acaba sendo um fator determinante no aproveitamento das propriedades de conformação dos materiais. Com base em objetivos de trabalhos anteriores que visam analisar o ferramental, o ponto de estrição pode ser obtido através de análise DIC (Correlação Digital de Imagem). Este artigo apresentará uma pesquisa que tem como objetivo a tratativa de controles de estrição com o uso de DIC, determinando como o ferramental pode executar os métodos tradicionais de CLC evitando a ruptura e assim preservando propriedades mecânicas que são desejáveis para a conformação. Primeiramente realizando o ensaio tradicional Nakazima monitorado, para que possa ser analisado em softwares DIC. Por fim, novos ensaios serão realizados desta vez parando o ferramental no ponto de estrição do material. Estes métodos proporcionarão múltiplas CLCs e as análises e discussões serão em cima destas curvas proporcionando então uma nova metodologia com ganhos em conformabilidade para o cenário industrial.

Palavras-chave: Aços avançados, CLC – Curva Limite de Conformação, análise DIC, Ensaio Nakazima.

(1) Mestrando, Universidade Federal do Paraná, murilo.cruz@ufpr.br.

(2) Prof. Dr.; Universidade Federal do Paraná, ravilson@ufpr.br.

(3) Prof. Dr.; Universidade Federal do Paraná, marcondes@ufpr.br.

1. INTRODUÇÃO

Apesar da ampla utilização de procedimentos de estamparia e demais processos clássicos de conformação, o cenário industrial ainda necessita de técnicas mais eficientes nesses processos, visando melhor qualidade de produtos, mais produtividade e redução de custos.

A indústria automotiva, juntamente com a linha branca, são os maiores consumidores de peças oriundas de conformação de chapas metálicas. No cenário automotivo, melhorias na performance do veículo, segurança e redução de poluentes também são necessidades atuais, e podem ser obtidas através de melhorias no desenvolvimento das carrocerias de acordo com pesquisas de KEELER e MENACHEM (2014), BARLO et al. (2019). Sendo a carroceria de um veículo praticamente toda feita de aços estampados, trabalhos focados no desenvolvimento de aços mais eficientes, diferentes tecnologias e métodos que melhoram a análise do processo são sempre necessários.

Desta forma, o presente trabalho tem como finalidade principal, desenvolver técnicas mais sofisticadas para a análise de variáveis que afetam a conformabilidade dos aços durante a estampagem. Nesse sentido buscou-se, para os ensaios de estampagem, a implementação de recursos tecnológicos e diferentes metodologias (MARTINEZ-DONAIRE et al., 2014; ZHANG et al., 2021) capazes de trazer informações de forma ágil e precisa, cujos resultados possam representar um avanço significativo aos processos industriais.

2. METODOLOGIA

O primeiro material utilizado no trabalho foi o aço BH220 com 1,50 mm de espessura, para a primeira sessão de testes, cujo objetivo foi tornar o sistema DIC funcional para utilização em ensaios de estampagem. A partir dos resultados desses testes, com o aço BH220, tornou-se possível a calibração final do sistema para posterior realização de ensaios com aços AHSS.

Seguindo a linha de pesquisa de CHEMIN (2013) e OLIVEIRA (2022), cujo enfoque dos trabalhos foram os aços AHSS, selecionou-se o aço DP780, com 0,95 mm de espessura para a realização da segunda fase de testes previstas nesse trabalho.

Para a captura das imagens dos ensaios, foi acoplada à ferramenta, uma câmera esportiva portátil, posicionada dentro da matriz e apontada numa direção perpendicular ao corpo de prova durante a estampagem. Além da câmera, utilizou-se um sistema de iluminação interna e lentes especiais para um enquadramento e focalização adequados das imagens geradas. Todos os ensaios foram realizados no laboratório de conformação da Universidade Federal do Paraná.

2.1 Ensaios para o desenvolvimento do DIC

Foram definidos corpos de prova com geometrias de 200 mm de lado e com oito dimensões diferentes de largura para a etapa de desenvolvimento do sistema DIC, realizada com o aço BH220. As dimensões dos corpos de prova utilizados nos ensaios Nakazima. Todos os corpos de prova foram devidamente preparados, com a gravação de uma malha de círculos, por processo silk screen, em sua superfície, para a medições das deformações.

Assim, realizou-se a sequência de ensaios. Cada bateria de testes foi repetida sucessivamente, até que a funcionalidade e posterior calibragem do sistema DIC fossem conseguidos. Nesta etapa, além dos drawbeads plano e circular, foram utilizadas duas diferentes forças de prensa-chapas: 58 e 80 tf.

2.2 Ensaios para avaliação de estampabilidade do aço DP780 com sistema DIC

Com o sistema devidamente calibrado, foram realizados os ensaios com o aço DP780, seguindo a mesma configuração de ensaios da fase anterior de testes. Para esta etapa, foram observados resultados satisfatórios para os ensaios com DIC na região de estiramento da chapa, segundo os apontamentos bibliográficos obtidos. Portanto, os testes com o aço DP780 foram limitados apenas às três dimensões de corpos de prova indicados.

Seguindo o desenvolvimento da pesquisa de LIMA (2017), para avaliação de início de estrição em aços AHSS, cujo início da estrição do aço DP600 foi atingido com 95% do valor da força máxima de ruptura da chapa, adotou-se no presente estudo o mesmo percentual limite de força para determinação do início da estrição do aço DP780.

Assim, foram realizados ensaios com o sistema DIC até o limite de ruptura do aço DP780, para determinação da força máxima de estampagem até a ruptura do material. A partir desses dados definiu-se a força de início de estrição das amostras, em 95% da força máxima, para sequência de testes com o sistema DIC até o limite de estrição. A configuração de ensaios realizados com o DP780, nesta fase, limitados ao drawbead circular e força de prensa-chapas de 80 tf.

3. DESENVOLVIMENTO E RESULTADO

Para a captação de imagens durante o embutimento das chapas no ensaio Nakazima, foi necessária a utilização de uma câmera de alta resolução com sistema especial de lentes adicionadas, posicionada dentro da matriz, para obtenção das imagens de forma perpendicular à região de deformação das chapas, em níveis de resolução e clareza ideais para serem posteriormente trabalhadas.

Esta etapa consistiu em trazer os vídeos gravados dos ensaios para análise computacional de correlação de imagem. Assim como foi abordado na revisão bibliográfica, muitos autores utilizaram de softwares específicos para a análise de DIC, e existem atualmente softwares Open Source que não dependeriam de licença ou algum outro tipo de intermédio para poderem ser utilizados para os resultados deste trabalho.

Utilizou-se o método temporal para determinação do início da difusão da estrição, através de softwares de tratamento de imagem e de correlação de imagem (DIC). A partir do quais fez-se a exportação dos dados de deformação e a plotagem do gráfico de deformação por tempo que, por sua vez, pôde ser determinado através do próprio tempo de gravação do vídeo.

Para cada amostra foi necessário quantificar a deformação máxima e o ponto de início de difusão da estrição e, com estes dados, determinar a força correspondente de estampagem. A prensa hidráulica utilizada para o trabalho possui um registro e controle CLP que consegue registrar o ensaio com dados de avanço do punção e força por período como apontados no trabalho de CHEMIN (2013), e LIMA (2017). Assim estabeleceu-se uma correlação do ponto de estrição com a pressão (força) registrada na máquina. Desta forma, a bateria final de testes teve o intuito de interromper o avanço do punção com o atingimento no nível de pressão correspondente ao início da estrição da chapa.

3.1 Correlação do DIC com o ponto de estrição

As deformações das amostras que compuseram o eixo de deformação dos resultados foram oriundas da análise DIC. Através do distanciamento do padrão original que foi demarcado na amostra, o software permitiu analisar a imagem gradativamente, e assim representar o grau de deformação da chapa a partir do distanciamento deste padrão inicial. Com esses dados e a base de informações da revisão bibliográfica, tornou-se possível neste trabalho a determinação do ponto de início de difusão da estrição na chapa.

Por fim, uma das contribuições da pesquisa é realizar comparativamente o ensaio tradicional que resulta na CLC, porém dessa vez parando a máquina na pressão que for determinada anteriormente como o início de estrição do material pelo DIC. O trabalho tem essa premissa devido à preservação das propriedades mecânicas do material e consequentemente preservando a conformabilidade do material. Essa nova CLC irá apresentar novos dados de deformação por serem obtidos pré-ruptura, com a máquina sendo interrompida durante o ensaio ao chegar no ponto de estrição. Tendo novos resultados e uma CLC com possíveis ganhos em termos de conformabilidade com aquele fornecido pelo fornecedor do material ou convencionalmente conhecido.

O Aço Avançado de Alta Resistência escolhido para análise final foi o DP780, os aços DP já possuem resultados conhecidos nos trabalhos de CHEMIN (2013), LIMA (2017), OLIVEIRA (2022) e CRUZ et al. (2023). O aço foi escolhido devido a sua alta resistência, e sua menor faixa de região elástica que poderá acarretar significativas conclusões para o trabalho.

3.2 Software DIC

Para a realização da análise por correlação de imagem, é necessária uma ferramenta que possibilite realizar uma comparação. No caso do DIC, compara-se diferentes imagens tomando uma como referência e mostrando as diferenças entre essas. No caso de estudos de materiais com análise DIC, essas diferenças

são interpretadas como deformações, visto que não há movimento relativo entre o dispositivo que adquire as imagens (câmera) do material.

Nos estudos (MARTINEZ-DONAIRE et al., 2014; ZHANG et al., 2021) e para este trabalho, as imagens para análise são retiradas de uma gravação de vídeo. Como um vídeo é uma união de quadros de imagens, é possível separar estes quadros em intervalos de tempos iguais e desta forma determinar a variável tempo para este intervalo e realizar a comparativa para cada quadro respectivo. Para a pesquisa foram selecionados trechos de gravações de 5 segundos seccionados em 10 quadros por segundo obtendo 50 quadros por trecho, para um intervalo de quadros de 0,1 segundo. É importante a variável tempo ser bem definida para realizar a análise dos resultados e a plotagem dos gráficos.

Outro aspecto fundamental para análise DIC é a composição de imagem. As imagens digitais, que são as imagens mais comumente utilizadas na atualidade é um aglomerado de pixels, cada um com forma quadrada e unicolor. A quantidade de pixels de uma imagem determina a sua resolução e quanto maior a resolução, mais detalhada a imagem. É possível determinar a posição de cada pixel em uma imagem, em coordenadas de X e Y para uma imagem em 2D. A análise DIC consiste em comparar pixels, ou pequenos aglomerados de pixels por coordenada e verificar se houve mudança em sua representação (em sua cor). Portanto para auxiliar na facilidade de análise DIC, é preferível imagens com um alto nível de contraste possibilitando assim uma fácil identificação de diferença entre pixels.

A ferramenta que acaba interpretando as diferenças entre as imagens e relatando é o software DIC. Os softwares podem ser programados em diversas linguagens de programação, em escala comercial estes softwares são utilizados internamente pela empresa que detém os direitos ou fornecido sob licenciamento. Um dos objetivos deste trabalho é utilizar de softwares DIC Open Source, podendo assim ser utilizado de forma livre sem correr o risco de ferir direitos autorais.

Através da bibliografia, sabe-se que os principais e mais utilizados softwares DIC são licenciados, e a maioria dos Open Source são muitas vezes oriundos de trabalhos de pesquisa sem muitas etapas de validação. Este trabalho julgou necessário averiguar alguns softwares disponíveis e verificar se atende às necessidades de análise.

Para definir o procedimento experimental deste trabalho, foi necessário determinar qual seria o software de análise de imagem antes de entrar na etapa de realização dos ensaios e discussão de resultados. Os softwares comerciais acabam tendo etapas de validações muito mais rigorosas para que sejam utilizados por empresas, dessa forma entende-se que para o cenário de análise de imagem, são mais assertivos e renomados dos que os Open Source. Desta forma, para este trabalho observou-se necessário a conferência e análise dos resultados obtidos pelos softwares testados, levando em conta também a factibilidade e a confiabilidade dos dados no momento de discutir os resultados.

Visto que o sistema operacional mais usualmente utilizado em computadores é o sistema operacional Windows (Microsoft), determinou-se a busca para softwares criados para este sistema. O sistema operacional utilizado pela universidade e no laboratório de conformação da UFPR também é o mesmo. Com isso, os Softwares escolhidos também tiveram o critério de linguagem de programação em que foram programados, mais uma vez levando em conta a popularidade da linguagem de programação, possibilitando eventuais manuseios no código e para trabalhos futuros.

Primeiramente foram utilizados softwares programados em Python, sendo esta linguagem de fácil utilização e totalmente gratuita. Um dos trabalhos da revisão bibliográfica BELLONI et al. (2019) mostrou etapas de validação de um software Open Source programado em Python. Neste trabalho há também um comparativo de demais softwares DICs para validação do novo proposto. De qualquer forma, ao tentar replicar os resultados do trabalho ou utilizar dos exemplos pré-existentes, não houve sucesso.

Finalmente, o software Ncorr foi testado para análise de viabilidade de utilização para o trabalho. O software Ncorr também foi utilizado como um dos critérios de validação no trabalho do mesmo trabalho de BELLONI et al. (2019) como referência de software DIC por ser mais renomado e ter um número razoável de citações em outros trabalhos. Para este trabalho, a intenção inicial não era de utilizar programas MATLAB para execução devido à sua necessidade de licença para operação, porém como a UFPR disponibiliza de software MATLAB e existem licenças estudantis temporárias, tornou-se uma opção viável. O software Ncorr apresenta um alto nível de intuitividade e interface amigável de operação, contendo um site, tutoriais no manual de utilização ao usuário.

3.3 Validação do Software

As primeiras utilizações do software Ncorr foram voltadas à análise do software em si com imagens de demonstração vindas do próprio programa. Apesar de ser uma análise importante para aprender a manusear e verificar acessibilidade e funcionamento da ferramenta, entende-se que essas imagens de demonstração são menos suscetíveis de apresentar erros ou dificuldades, somente para demonstrar o aplicativo. Para garantir que o Ncorr cumpriria todas as necessidades do trabalho, o esperado era que este apresentasse bons resultados com as imagens obtidas pela metodologia estabelecida pelo trabalho com a mesma qualidade das imagens de demonstração. O material utilizado nessa etapa de desenvolvimento de DIC eram chapas amostrais disponíveis no laboratório.

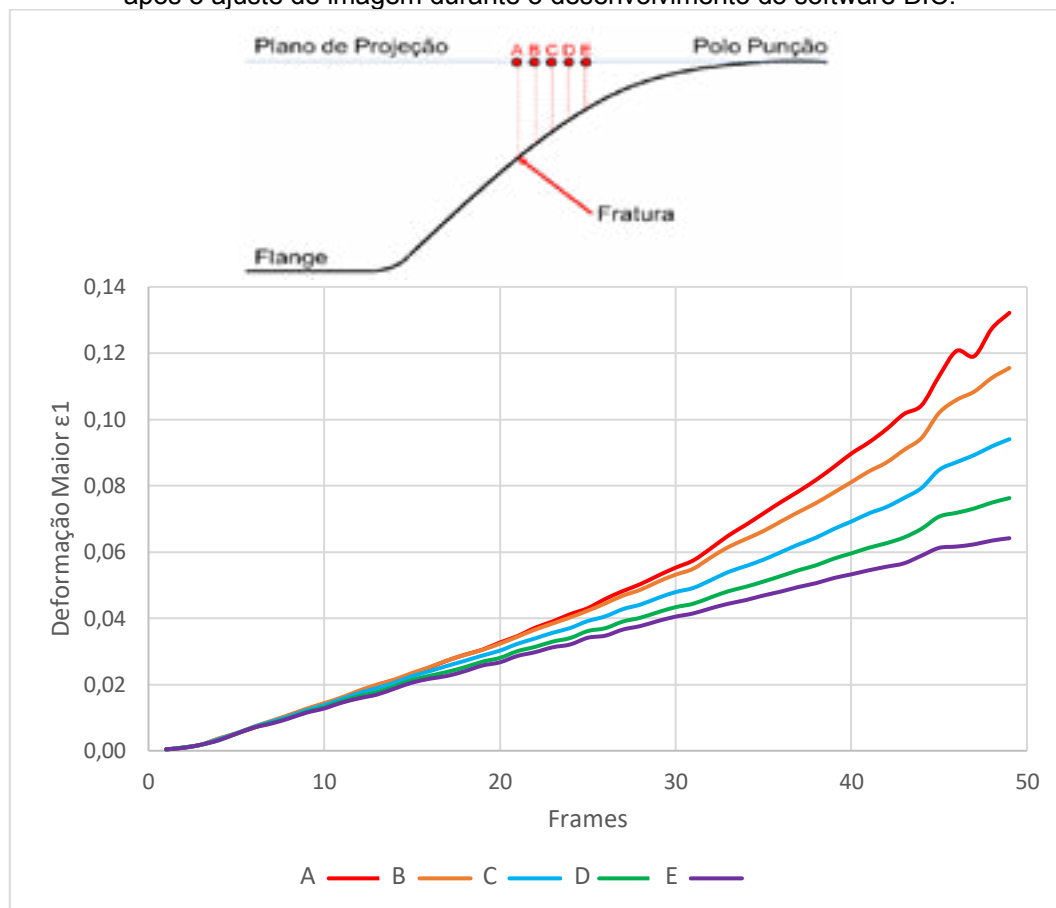
Verificou-se que apesar do Ncorr estar avaliando as imagens capturadas como o previsto, não estava refletindo as reais condições ou deformações que ocorriam nas amostras. Para determinar finalmente a metodologia de ensaio, foi necessário trabalhar em possíveis ajustes nas imagens adquiridas o máximo para que essas divergências de resultados de análise do software com os dados reais fossem as menores possíveis.

O efeito de profundidade foi o principal efeito de divergência nos resultados obtidos durante o teste. Este efeito estava sendo agravado principalmente por dois principais fatores óticos que são consequência da metodologia empregada no ferramental disponível. O primeiro fator é a distância entre a amostra e a câmera, devido à limitação de espaço dentro da câmara da prensa essa distância acaba sendo muito curta. Consequentemente com o avanço do punção a amostra se aproxima ainda mais da câmera e o software acabava entendendo como uma deformação excessiva, pois a imagem aumentava muito de tamanho ao decorrer do ensaio. Este aumento trata-se da quantidade de pixels que a imagem acabava ocupando no decorrer do ensaio quando comparado ao referencial original.

Foram determinados os pontos (A), (B), (C), (D) e (E) (representados na Figura 1) para verificar a evolução da trinca, e em seguida obter o gráfico da máxima deformação pelo tempo e da velocidade de máxima deformação pelo tempo.

O gráfico de deformação pelo tempo da Figura 1 mostra a evolução da trinca após o ajuste de imagem a diferença dos pontos de (A) até (E) onde as pré-rupturas ficaram mais evidentes, isso devido à melhoria no mapa de deformação resultante.

FIGURA 1 – Gráfico de evolução da deformação durante a estampagem na região de fratura após o ajuste de imagem durante o desenvolvimento do software DIC.

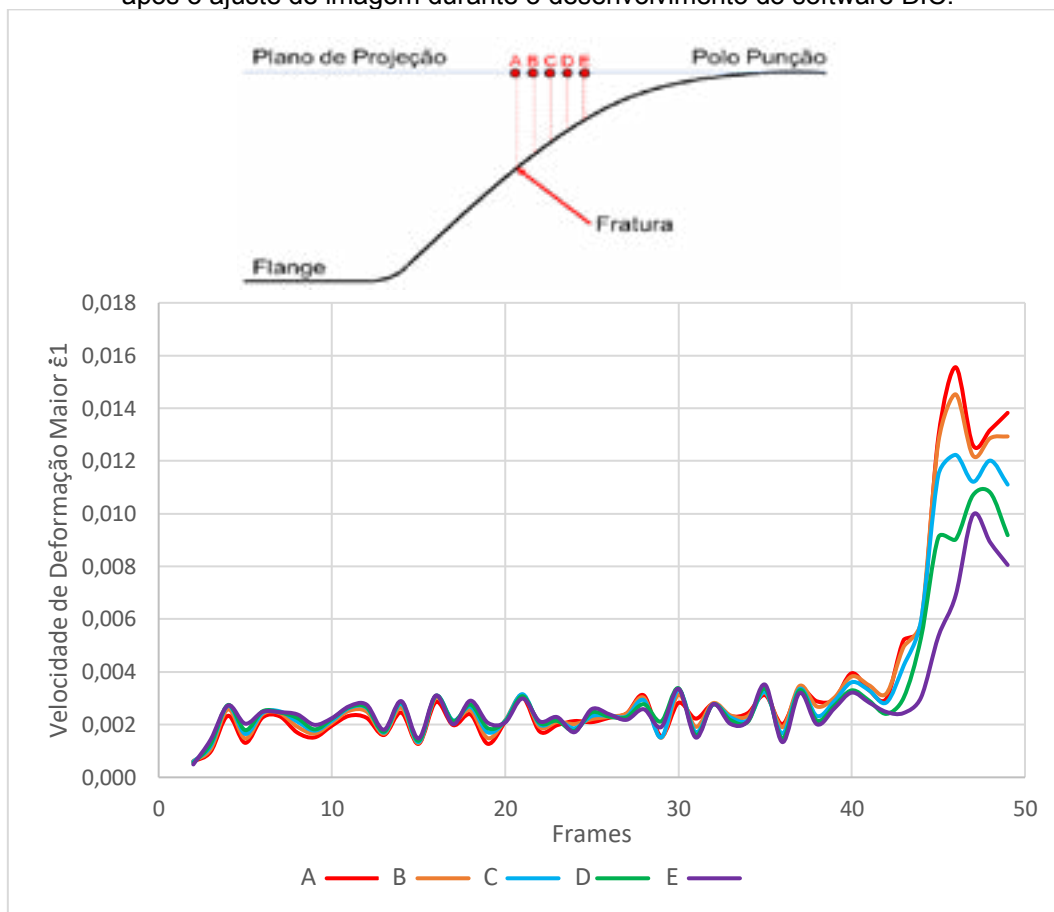


FONTE: O autor (2023). LEGENDA: Ao longo do perfil estampado da chapa: (A) no local da trinca, (B), (C), (D) intermediários entre o polo do punção e a trinca, e (E) na região polo do punção, são pontos equidistantes entre si.

O gráfico que apresentou maiores evoluções após o ajuste de imagem foi o da velocidade de deformação, ficando com curvas muito mais semelhantes com as da revisão bibliográfica. Pelo gráfico da figura 2, é possível identificar a região de fratura do corpo de prova assim como também observar uma região pré ruptura que pode ser interpretado como a região de difusão da estrição.

É possível notar como as curvas de (A) até (E) estão juntas até aproximadamente entre a etapa 35 e 37 (frame), e que a partir desse intervalo as curvas tomam valores distintos, e essa distinção que revela uma separação (Figura 2) e conseqüentemente um início da difusão da estrição. Materiais que possuem maior alongamento conseguem representar melhor essa região pois acabam ficando mais visíveis no vídeo e conseqüentemente mais bem interpretados pelo software Ncorr.

FIGURA 2 – Gráfico da velocidade de deformação durante a estampagem na região de fratura após o ajuste de imagem durante o desenvolvimento do software DIC.



FONTE: O autor (2023). LEGENDA: Ao longo do perfil estampado da chapa: (A) no local da trinca, (B), (C), (D) intermediários entre o polo do punção e a trinca, e (E) na região do polo do punção, são pontos equidistantes entre si.

4. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos para os ensaios de estampagem do aço BH220 e DP780, pode-se dizer que houve uma considerável diferença nos limites de estrição definidos pelo método experimental e o estabelecido no DIC. O limite de estrição determinado pelo DIC foi superior àquele definido em 95% da força máxima de estampagem da chapa, sendo cabíveis análises futuras para maior acuracidade dos resultados. Independentemente do refino dos resultados, o trabalho atingiu o objetivo proposto de se desenvolver uma metodologia de análise mais acessível e iterativa para o ensaio de estampagem Nakazima, uma vez que a análise através de correlação de imagem, adotada como ferramenta para isso, se mostrou bastante eficiente.

Para a análise de conformabilidade de chapas metálicas com DIC, pode-se dizer ainda que, para aços com menor ductilidade, o uso do DIC acaba sendo mais difícil, devido à interpretação do software quanto ao início da difusão da estrição. O aço DP780 apresentou em seus gráficos menores evoluções na região da fratura, sendo mais difícil determinar ao certo o início da difusão da estrição através dos gráficos resposta, quando comparado ao BH220, cuja ductilidade é maior.

Pode-se dizer também que o DIC pode ser evoluído ainda mais, com um melhor sistema de captura de imagem e maior controle ou eliminação do efeito de profundidade. Assim, a metodologia adotada também mostra a importância de uma captura de imagem bem focalizada, contemplando toda a região de deformação da chapa até a propagação da trinca. O aprimoramento dos softwares, para redução do tempo de trabalho com os dados e processamento de resultados, ou uma possível automatização do sistema, com interface junto a máquina, ficam como possibilidades para trabalhos futuros.

Referências

BARLO, A. et al. On the Failure Prediction of Dual-Phase Steel and Aluminium Alloys Exposed to Combined Tension and Bending. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 651, p.012030-12040, nov. 2019.

CHEMIN FILHO, R. A. et al. An experimental approach for blankholder force determination for DP600 with different material flow strain rates in the flange during stamping. **Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part B:**

CRUZ, M. et al. Influence of the hydraulic press system on advanced high-strength steel formability. **INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY**, v. 126, p. 4722, 2023.

KEELER, S.; MENACHEM, K. Advanced High-Strength Steels Application Guidelines. **Worldautosteel**, 2014.

LIMA, E. Avaliação do Limite de Estricção do Aço Dual Phase DP 600 Através da Curva Limite de Conformação. **37th SENAFOR, 7th International Sheet Metal Forming**, 2017.

MARTÍNEZ-DONAIRE, A.J. et al. New Approaches to Detect the Onset of Localised Necking in Sheets Under Through-Thickness Strain Gradients. **Mater. Des.** 57, 135–145, 2014.

OLIVEIRA, A. R. et al. Influence of drawbead geometry and blank holder force on the dual phase steel formability. **INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY (INTERNET)**, v. 121, p. 4255, 2022.

ZHANG, R. et al. Biaxial Test Method for Determination of FLCs and FFLCs for Sheet Metals: Validation Against Standard Nakajima Method. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 209, n. 106694, 2021.



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil
26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

COMPARATIVO DE ESTAMPABILIDADE ENTRE UM AÇO MICROLIGADO E UM AÇO CARBONO-MANGANÊS⁽¹⁾

Daniel Augusto Ferro ⁽²⁾
Fernando Generoso⁽³⁾

Resumo

Visando atender uma demanda de maior capacidade de conformação mantendo elevados níveis de resistência mecânica almeja-se, neste estudo, realizar um comparativo entre composição química, microestrutura, propriedades mecânicas e estampabilidade de um aço Carbono-Manganês e um aço de alta resistência e baixa liga (ARBL) com limite de escoamento mínimo de 350 MPa, uma vez que inúmeras peças fabricadas com essa classe de aço apresentam elevado repuxo inclusive com expansão de furo, como é o caso da peça objeto deste estudo.

Mediante ajustes de composição química e tratamento termomecânico para melhor estabilidade de propriedades mecânicas e espessura, foi possível obter boa conformabilidade do aço microligado, cujas propriedades mecânicas encontradas foram (limite de resistência 472 MPa, limite de escoamento 404 MPa, alongamento base 50 de 35% e expoente de encruamento n de 0,16) e microestrutura com tamanho de grão 6, inclusões não metálicas globulizadas tipo D nível 1 e série fina além de carbonetos esferoidizados uniformemente distribuídos na matriz ferrítica ao passo que o aço Carbono-Manganês com limite de resistência e escoamento similares apresentou resultados comparativamente piores em relação a conformabilidade (limite de resistência 508 MPa, limite de escoamento 398 MPa, alongamento base 50 de 32% e expoente de encruamento n de 0,12), microestrutura com tamanho de grão 9, inclusões não metálicas alongadas tipo C nível 1 série fina e fração de perlita lamelar que, morfologicamente, não é a microestrutura mais indicada para processos de conformação.

Face ao exposto, o desenvolvimento do trabalho possibilitou elevar a conformabilidade do aço facilitando a estampagem da peça estudada e sem a presença de trincas, mesmo em trechos de elevada conformação/expansão de furo conforme foi possível observar nas fotos comparativas das peças estampadas com o aço Carbono-Manganês e o Microligado projetado para melhor conformabilidade.

Palavras chave: Aços Estruturais; Aços Carbono-Manganês; Aços Microligados (ARBL); Estampabilidade; Expansão de Furo.

ABSTRACT

Aiming to reach higher stampability and maintaining high levels of mechanical properties, the intention of this paper is to make a comparison of stampability between Carbon-Manganese (C-Mn) and High Strength Low Alloyed (HSLA) steels with yield strength above 350 MPa, since many parts manufactured with this steel grade normally have high deformation mainly on hole expansion areas, as it is the case of the part studied.

Through the use of chemical composition adjustments and thermomechanical treatment for better stability of mechanical properties and thickness variation it was possible to reach good stampability of microalloyed steel (HSLA) whose mechanical properties achieved were (Strength limit of 472 MPa, Yield limit of 404 MPa, Elongation on 50mm basis of 35% and Hardening Exponent of 0,16) and microstructure with grain size 6, fine series and globalized non metallic inclusions level 1 type D plus spheroidized carbides randomly spread on a ferritic basis in comparison to the Carbon-Manganese steel with similar mechanical properties that presented worse stampability results (Strength limit of 508 MPa, Yield limit of 398 MPa, Elongation on 50mm basis of 32% and Hardening Exponent of 0,12), microstructure with grain size 9, fine series and elongated non metallic inclusions level 1 type C and fraction of lamellar pearlite which morphology is not recommended to be deformed during stamping process.

Having said that, the development of this article increased the steel stampability where it was possible to manufacture parts without any cracks even in hole expansion areas as it could be seen in the comparative photos taken from the parts manufactured with Carbon-Manganese and High Strength Low Alloy steels.

Key-words: Structural Steels; Carbon-Manganese Steels; High Strength Low Alloy Steels (HSLA); Stampability; Hole Expansion.

(1) Trabalho apresentado na 25^a Conferência Nacional de Conformação de Chapas;

(2) Engenheiro Mecânico pelo Instituto Mauá de Tecnologia, Mestre em Engenharia Metalúrgica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Engenheiro de Assistência Técnica e Desenvolvimento de Produto da Waelzholz Brasmetal (daniel.ferro@waelzholz.com);

(3) Engenheiro Metalurgista pela Universidade Federal de Ouro Preto, Mestre em Engenharia Metalúrgica pela Universidade Federal Fluminense, Especialista de Desenvolvimento de Produtos da Arcelor Mittal Tubarão. (fernando.generoso@arcelormittal.com.br).

1. INTRODUÇÃO

Com uma demanda cada vez maior por aços planos de elevada propriedade mecânica e boa estampabilidade, além de uma maior estabilidade dimensional da peça estampada, são necessários estudos e desenvolvimentos dos aços estruturais aliando esforços tanto no que tange o processo siderúrgico quanto o processo metalúrgico de forma a atender os requisitos de conformabilidade da peça com mínima variação possível na espessura e propriedades mecânicas destes aços, possibilitando em muitos casos a redução de espessura e peso das peças submetidas a esforços durante seu uso sem comprometer a segurança da aplicação final, além de redução de custo devido à redução de peso na peça estampada.

Uma forte motivação para a redução no peso das peças automotivas é a inerente redução do consumo de combustível com a diminuição do peso do carro como um todo.

Outra demanda necessária para o setor é a homogeneidade de propriedades mecânicas e espessura ao longo das bobinas e lotes fornecidos, uma vez que esse requisito permite uma melhor estabilidade do processo de conformação e do dimensional das peças com o mínimo de ajustes no ferramental usado na estampagem das mesmas.

Além das características técnicas demandadas pelo mercado, um custo competitivo no processo de produção do aço bem como de transformação do mesmo em peças com o mínimo de variação dimensional possível é primordial, dada a elevada exigência por qualidade e custo do mercado a que se destina as peças estampadas.

2. OBJETIVO

O trabalho tem o objetivo de relatar o processo de desenvolvimento de um aço plano microligado com valores especificados de limite de resistência de 450 a 570 MPa, limite de escoamento de 350 a 450 MPa, alongamento na base 5 de 25% mínimo e dimensões de 2,5mm de espessura por 245mm de largura aplicado em uma peça usada no sistema de travamento da porta de veículos automotores. Este aço foi classificado como LNE355 conforme norma NBR 6656:2016, porém com propriedades mecânicas ligeiramente diferenciadas se comparado com a norma pública pois a produção era originalmente feita com aço Carbono-Manganês.

O projeto foi desenvolvido entre os grupos Arcelor Mittal e Waelzholz Brasmetal responsáveis pela produção e transformação do aço microligado sendo fornecido em bobinas laminadas a quente com processo de ajuste de espessura via laminação a frio para posterior transformação em peças através de estampagem com posterior revestimento de zinco com cromato como passivador, participaram do projeto de melhoria outros dois players da cadeia automotiva, um deles responsável pela conformação e revestimento da peça e outro pela montagem da mesma no sistema de travamento da porta.

3. PEÇA OBJETO DO ESTUDO

De forma a exemplificar o produto e as condições de acabamento em trechos de expansão de furo e sobretudo mantendo a confidencialidade das cotas de desenho para o qual este desenvolvimento foi direcionado, segue abaixo uma foto da peça, que é usada no sistema de travamento da porta do veículo automotivo. Atenção especial deve ser dada a condição de acabamento na região de expansão de furo.

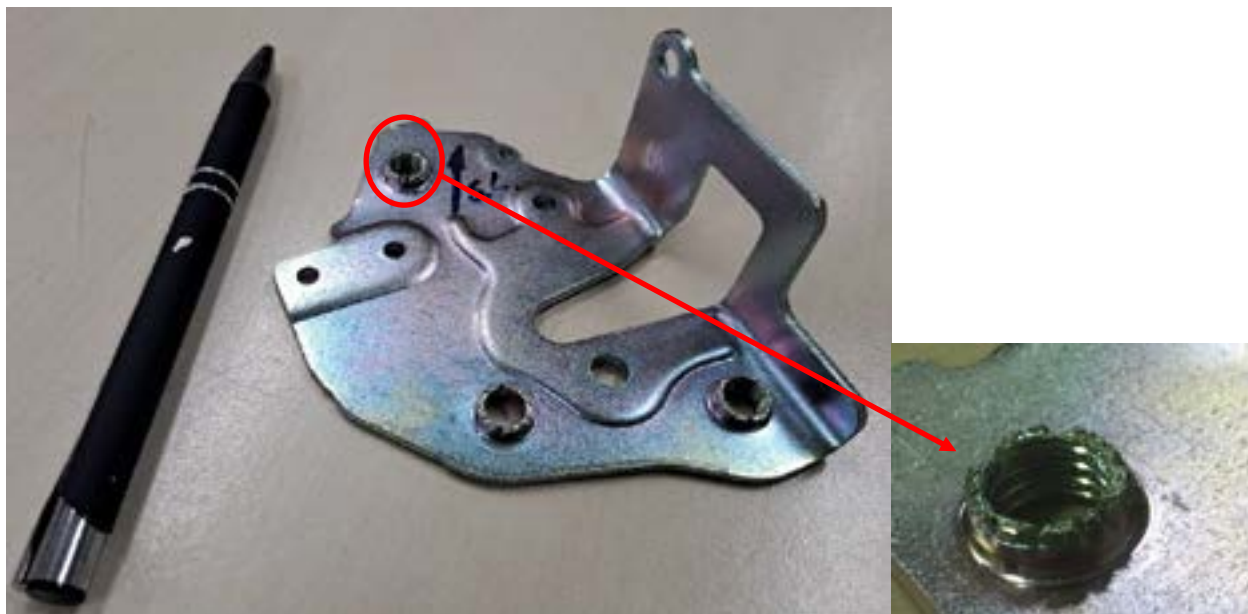


Figura 1: Foto da peça objeto do estudo com destaque as trincas presentes na região de expansão de furo.

Principal problema que ocorre durante a estampagem da peça em estudo é a presença de trincas em região de expansão de furo, inclusive comprometendo a fixação do parafuso usado durante montagem da peça no sistema de travamento da porta do veículo.

Tal anomalia também reduz a vida útil da broca usada para a usinagem da rosca, uma vez que a broca é integrada ao ferramental de estampagem onde a condição do repuxo influencia diretamente nos esforços da broca gerando quebra e desgaste prematuro com consequentes paradas da prensa para a troca da broca gerando maior tempo de setup durante processo de estampagem.

4. CORRELAÇÃO ENTRE EXPANSÃO DE FUROS, MICROESTRUTURA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA

De acordo com Takahashi⁽¹⁾ as propriedades mecânicas desejadas são determinadas pela combinação da microestrutura dos aços.

O endurecimento por precipitação é amplamente usado para diversos tipos de aço de alta resistência sendo introduzidos precipitados finos que podem elevar a resistência mecânica dos aços em 200 a 300 MPa além de contribuir para a expansão de furo, uma vez que, durante o reaquecimento da placa antes da laminação a quente, os elementos microligantes são facilmente dissolvidos na matriz austenítica.

Os principais elementos de liga usados no endurecimento dos aços por precipitação são Nb, Ti, Mo e V.

Ainda de acordo com Takahashi⁽¹⁾ diversos fatores influenciam na capacidade de expansão de furos em chapas de aço, entre eles a diferença de dureza entre as fases, número de fases duras, conteúdo de C, inclusões alongadas, textura cristalina, valor de índice de Lankford "R_{médio}" e de expoente de encruamento "n". Quanto maior a uniformidade da microestrutura, maior serão as propriedades de expansibilidade de furos no material.

É importante a redução de inclusões alongadas ao mínimo, adicionalmente também é necessário a redução de segregações e impurezas, uma vez que estas características interferem na expansibilidade de furos por estarem relacionados com pontos de nucleação de trincas durante processo de conformação.

5. CARACTERÍSTICAS DA LIGA LNE355 CONFORME NORMA NBR 6656:2016⁽²⁾

As composições químicas especificadas em norma para as diferentes grades de material microligado são dadas pela tabela abaixo com destaque a grade de aço objeto deste estudo:

Tabela 1: Composição química para diferentes grades de material microligado conforme norma NBR 6656:2016. Material objeto de estudo foi classificado com grau LNE355 com propriedades mecânicas diferenciadas.

Grau	C máx.	Mn máx.	Si máx.	P máx.	S máx.	Al mín.	Nb máx.	V máx.	Ti máx.	Mo máx.	B máx.
LNE200 ^a	0,12	0,60	0,35	0,025	0,025	0,015	0,12	0,12	0,20	-	-
LNE230 ^a	0,12	0,80	0,35	0,025	0,025	0,015	0,12	0,12	0,20	-	-
LNE260 ^a	0,16	1,00	0,35	0,025	0,025	0,015	0,12	0,12	0,20	-	-
LNE280 ^a	0,16	1,00	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20	-	-
LNE315 ^a	0,12	1,10	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20	-	-
LNE355 ^b	0,12	1,10	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20	-	-
LNE380 ^b	0,12	1,20	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20	-	-
LNE400 ^b	0,15	1,40	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20	-	-
LNE420 ^b	0,12	1,60	0,35	0,025	0,015	0,015	0,09	0,12	0,15	-	-
LNE460 ^b	0,12	1,60	0,35	0,025	0,015	0,015	0,09	0,12	0,15	-	-
LNE500 ^b	0,12	1,70	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20	-	-
LNE550 ^b	0,12	1,90	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20	-	-
LNE600 ^{b c}	0,15	1,90	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20	0,50	0,005
LNE650 ^{b c}	0,16	2,00	0,35	0,025	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20	0,50	0,005
LNE700 ^{b d}	0,18	2,10	0,55	0,030	0,015	0,015	0,12	0,12	0,20	0,50	0,005

^a Para os graus LNE200, LNE230, LNE260, LNE280 e LNE315, o somatório dos teores de Nb, Ti e V deve ser no máximo de 0,20.

^b Para os graus LNE355, LNE380, LNE400, LNE420, LNE460, LNE500, LNE550, LNE600, LNE650 e LNE700, o somatório dos teores de Nb, Ti e V deve ser no mínimo de 0,010 e no máximo de 0,22.

^c Para os graus LNE600 e o LNE650, o teor de Cr deve ser máximo 0,50 %.

^d Para o grau LNE700, o teor de Cr deve ser no máximo 0,60 %.

As propriedades mecânicas especificadas em norma para as diferentes grades de material microligado são dadas pela tabela abaixo com destaque a grade de aço objeto deste estudo, salientando que as faixas de especificação de limites de resistência/escoamento e alongamento são ligeiramente diferentes da norma por se tratar de uma adequação a especificação, uma vez que o aço originalmente especificado é o aço Carbono-Manganês com propriedades mecânicas já mencionadas no item 2.

Tabela 2: Propriedades mecânicas no sentido transversal ao sentido de laminação para diferentes grades de material microligado conforme norma NBR 6656:2016. Material objeto de estudo foi classificado com o grau LNE355 com propriedades mecânicas diferenciadas.

Grau	Limite de escoamento	Limite de resistência	Alongamento ($L_0 = 5,65\sqrt{S_0}$) mínimo	Calço de dobramento a 180° em função da espessura nominal "e" mm
	MPa	MPa	%	
LNE200	200 a 330	280 a 410	35	Zero
LNE230	230 a 360	330 a 460	30	
LNE260	260 a 390	370 a 500	30	
LNE280	280 a 420	380 a 520	28	
LNE315	315 a 455	390 a 530	25	
LNE355	355 a 510	430 a 570	24	
LNE380	380 a 530	460 a 600	23	
LNE400	400 a 530	520 a 650	23	e ≤ 10,00 – Zero e > 10,00 – 0,5 e
LNE420	420 a 540	520 a 650	22	
LNE460	460 a 580	540 a 680	18	e ≤ 10,00 – 0,5 e e > 10,00 – 1,0 e
LNE500	500 a 620	560 a 700	18	
LNE550	550 a 670	600 a 760	15	1,5 e
LNE600	600 a 720	650 a 800	14	2,0 e
LNE650	650 a 790	690 a 850	12	
LNE700	700 a 850	750 a 950	12	

6. MATERIAIS

Para o estudo realizado foram utilizados dois materiais distintos, um deles um aço Carbono Manganês (liga 1) e outro um aço Microligado com processo para estampabilidade melhorada (liga 2). Composição química, propriedades mecânicas, níveis de inclusões e microestrutura de ambas as ligas são informadas abaixo:

Tabela 3: Composição química das ligas 1 – Aço Carbono-Manganês e 2 – Aço microligado (LNE355 com propriedades diferenciadas).

Liga	C (%)	Mn (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Al (%)	V (%)	Ti (%)	Nb (%)
1 (C-Mn)	0,155	0,76	0,0216	0,0193	0,0116	0,0321	0,0006	0,0001	0,0030
2 (Microligado)	0,060	0,55	0,0130	0,0200	0,0069	0,0400	0,0010	0,0010	0,0249

Tabela 4: Propriedades mecânicas das ligas 1 – Aço Carbono-Manganês e 2 – Aço microligado (LNE355 com propriedades diferenciadas).

Liga	LR (MPa)	LE (MPa)	AI L05 (%)	Expoente de encruamento “n”
1 (C-Mn)	508	398	32	0,12
2 (Microligado)	472	404	35	0,16
Especificado	450 a 570	350 a 450	25 mín.	---



Figura 2: Foto da microestrutura da liga 1 (C-Mn) com aumento de 100x sem ataque representando nível de inclusões C1F conforme classificação da norma ASTM⁽³⁾.

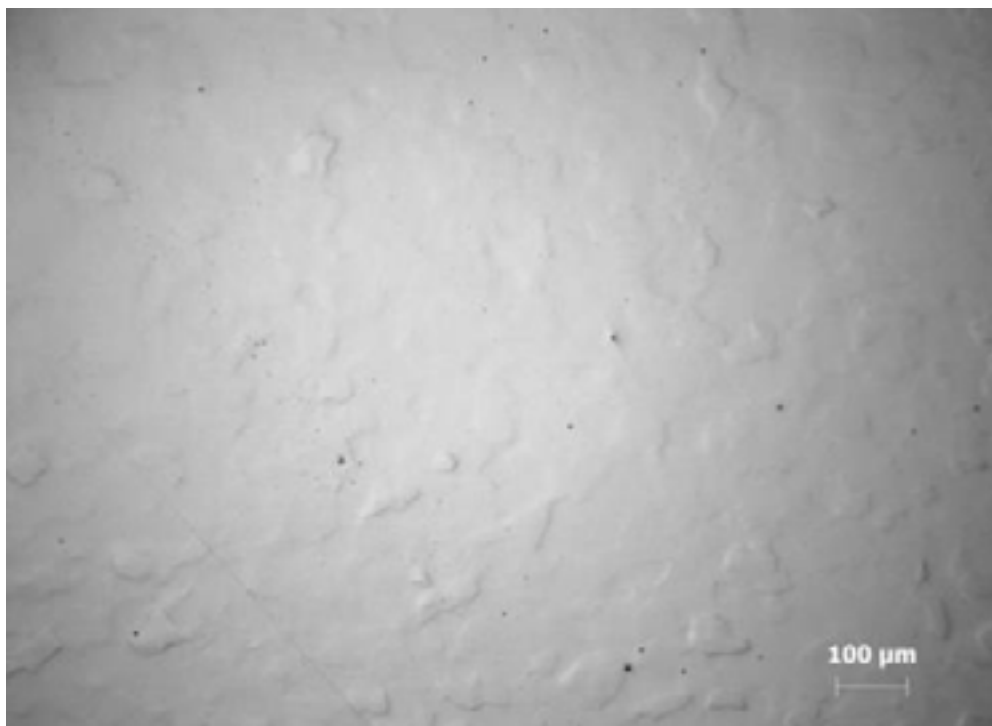


Figura 3: Foto da microestrutura da liga 2 (Microalloyed) com aumento de 100x sem ataque representando nível de inclusões D1F conforme classificação da ASTM⁽³⁾.



Figura 4: Foto da microestrutura da liga 1 (C-Mn) com aumento de 500x e ataque nital 3% (estrutura composta por ferrita + perlita fina). Tamanho de grão 9 conforme norma ASTM⁽⁴⁾

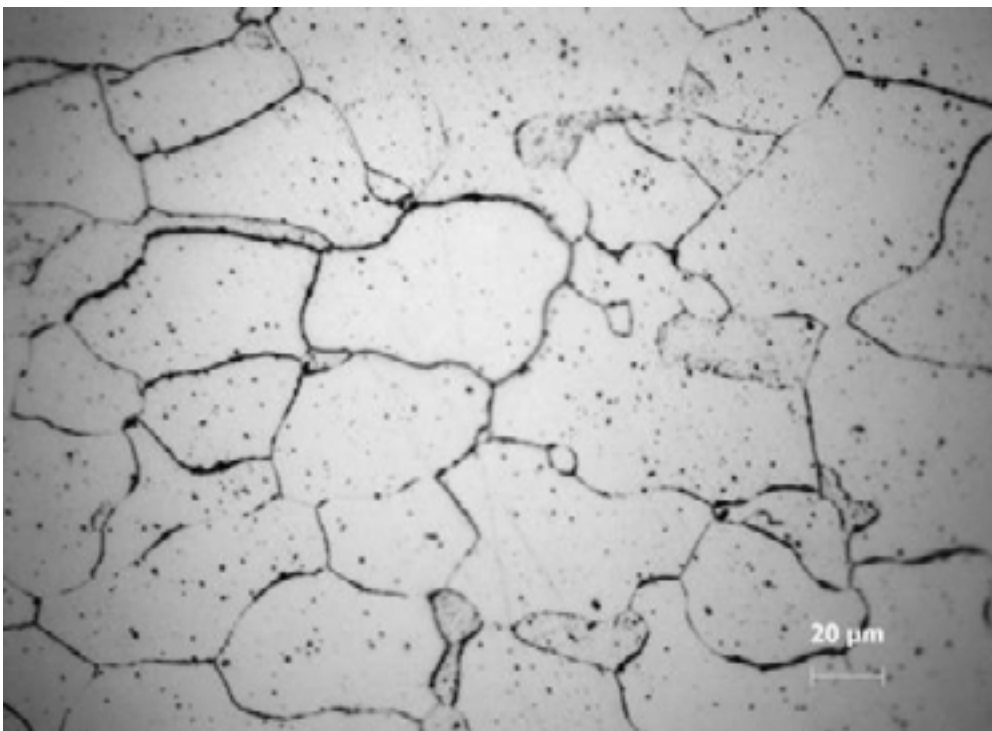


Figura 5: Foto da microestrutura da liga 2 (Microalloyed) com aumento de 500x e ataque nital 3% (estrutura composta por ferrita + carbonetos esferoidizados). Tamanho de grão 5 conforme norma ASTM⁽⁴⁾

6.1.PROCESSO SIDERÚRGICO

A elevação das propriedades mecânicas da liga 1 (C-Mn) se dá principalmente pela adição dos elementos químicos Carbono e Manganês sendo o Carbono agente formador da cementita (fase dura presente na perlita) além do endurecimento provocado por solução sólida juntamente com o Manganês e refino de grão.

O processo siderúrgico aplicado a liga 2 (Microligado) visou o aumento das propriedades mecânicas tanto por solução sólida através principalmente da adição dos elementos químicos Nióbio, Carbono e Manganês quanto por precipitação de carbonetos através do controle via processo termomecânico de forma a minimizar e distribuir uniformemente os precipitados que atuam como barreiras para a movimentação dos contornos de grão e discordâncias maximizando a estampabilidade da liga.

6.2.PROCESSO DE RELAMINAÇÃO

O material em estudo referente a liga 2 (Microligado) foi adquirido pelo grupo Waelzholz Brasmetal no estado laminado à quente com uma espessura de 2,60 +/-0,2mm e laminado visando atender uma faixa de espessura de 2,5 +/- 0,12mm.

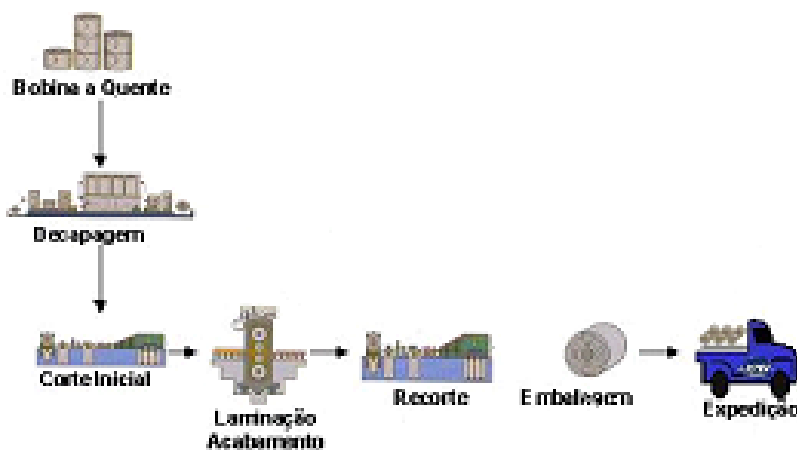


Figura 6: Fluxo de processo de laminação a frio utilizado para o material em estudo.

O processo de laminação a frio aplicado visou a redução na variação de espessura na bobina sem elevar significativamente as propriedades mecânicas do material laminado. Este processo foi aplicado com o intuito de minimizar a variação de rebarbas no furo que será conformado posteriormente, uma vez que o nível de rebarbas está diretamente relacionado com a espessura, propriedades mecânicas, microestrutura e folga entre matriz/punção na etapa de corte.

A figura abaixo mostra a variação de espessura do material ao longo rolo laminado a frio, excluindo-se os trechos de ponta de rolo sujeitos a maior variação de espessura, é possível observar uma variação total entre 2,45 e 2,49mm.

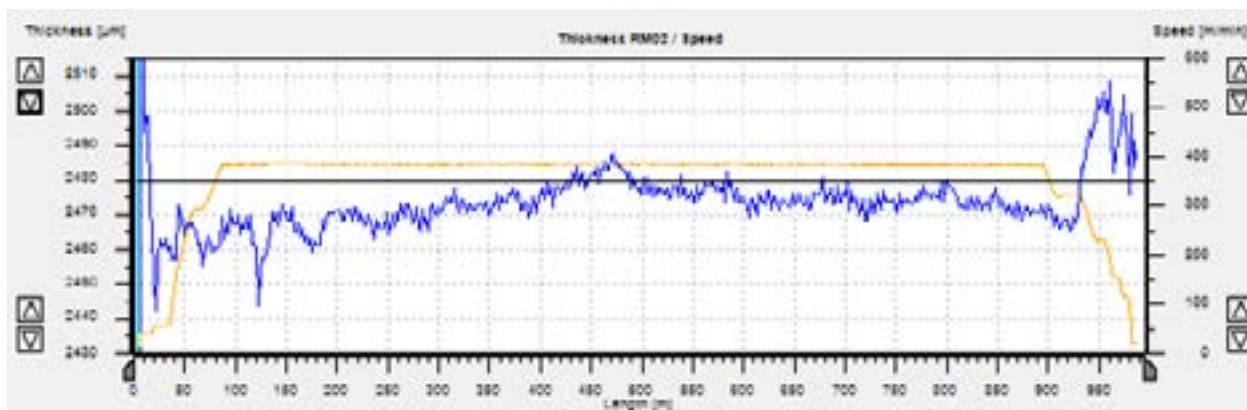


Figura 7: Gráfico de espessura coletado após processo de laminação a frio.

6.3.PROCESSO DE ESTAMPAGEM

O processo de estampagem empregado consiste na formação da peça através de uma prensa progressiva com usinagem da rosca integrada a ferramenta de estampagem.

Visando proteger o know-how da empresa que transforma o aço em peça não serão abertas informações no que tange o processo de conformação, desenho da peça tão pouco número de estágios de conformação.

7.MÉTODO

7.1.COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A composição química foi realizada em Espectrofotômetro de Emissão Óptica conforme mostra a figura abaixo:



Figura 8: Espectrofotômetro de Emissão Óptica Spectrolab.

7.2. PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas foram obtidas conforme norma NBR 6673:1981⁽⁵⁾. Foi retirado um corpo de prova de tração perpendicular ao sentido de laminação para cada amostra analisada.

Os ensaios foram realizados em máquina de tração Zwick modelo Z250 equipada com garras hidráulicas e extensômetro.



Figura 9: Máquina de Tração Zwick Z250.

7.3. MICROSCOPIA ÓPTICA (MO)

Análise de microestrutura foi realizada em uma amostra de cada liga. As amostras foram devidamente polidas e atacadas com reagente nital 3% para visualização da microestrutura, conforme ilustra a figura abaixo.

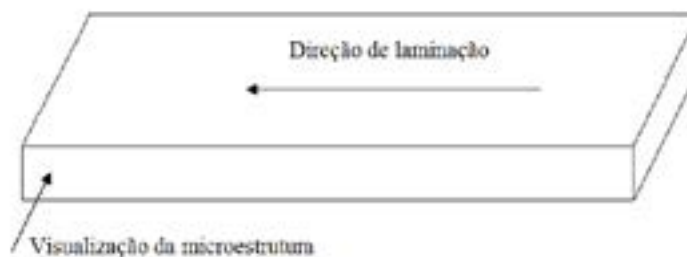


Figura 10: Ilustração da amostragem para avaliação da microestrutura.

A verificação da microestrutura foi feita com uso de microscópio do fabricante Leica conforme figura abaixo:



Figura 11: Microscópio Leica modelo DM2700M

8.RESULTADOS DOS TESTES DE CONFORMAÇÃO

A figura abaixo mostra um comparativo entre os testes de conformação das ligas 1 (C-Mn) e 2 (Microligado) para as mesmas configurações de prensa e ferramenta de estampagem.



Figura 12: Condição do repuxo da liga 1 (C-Mn) foto à esquerda e liga 2 (Microligado) foto à direita.

9.DISSCUSSÃO

9.1.PROPRIEDADES MECÂNICAS

Comparando os resultados das propriedades mecânicas nas ligas 1 (C-Mn) e 2 (Microligado) foi possível notar uma melhor condição para conformação na liga 2, apesar de valores de limite de escoamento ligeiramente maiores se comparado com a liga 1, 404 MPa e 398 MPa respectivamente. A melhor conformabilidade da liga 2 se explica principalmente com base nos valores de alongamento e expoente de encruamento da liga 2 (35% e 0,16 respectivamente), sensivelmente melhores em relação a liga 1 (32% e 0,12 respectivamente).

Tais resultados explicam a melhor conformabilidade da liga 2 (Microligado) comparativamente a liga 1 (C-Mn).

9.2.MICROESTRUTURA

Possível observar que a liga 2 (Microligado) apresenta nível de inclusões D1F (inclusão de óxido globular nível 1 séria fina conforme quadro comparativo da norma ASTM⁽³⁾) e microestrutura composta por ferrita + carbonetos esferoidizados uniformemente distribuídos na matriz ferrítica com tamanho de grão 5 conforme norma ASTM⁽⁴⁾.

Já a liga 1 apresenta nível de inclusões C1F (inclusão de silicato alongada nível 1 série fina conforme quadro comparativo da norma ASTM⁽³⁾) e microestrutura composta por ferrita + perlita fina uniformemente distribuída com tamanho de grão 9 conforme norma ASTM⁽⁴⁾.

Realizando um comparativo tanto do nível de inclusões quanto da microestrutura das ligas, é possível confirmar a melhor conformabilidade da liga 2 (Microligado), uma vez que as inclusões globulizadas e estrutura com precipitados esferoidizados distribuídos uniformemente na matriz geram uma menor área de interface entre precipitados de elevada dureza (carbonetos e inclusões) e a matriz ferrítica de maior ductilidade, auxiliando a conformação e evitando a nucleação e conseqüente propagação de trincas. Ao passo que, na liga 1 (C-Mn), a presença de perlita e inclusões alongadas geram uma maior área de interface entre os precipitados duros e frágeis (placas de cementita presentes na perlita e inclusões alongadas) e a matriz ferrítica nucleando e propagando prematuramente as trincas durante processo de expansão de furo.

9.3.PROCESSO DE ESTAMPAGEM

Para a estampagem das ligas 1 (C-Mn) e 2 (Microligado) foi usada a mesma ferramenta com os mesmos ajustes de folgas entre matriz/punção, velocidade de conformação, sistema de lubrificação, pressão do martelo e prensa chapas sendo as diferenças encontradas nos testes de conformação das ligas 1 (C-Mn) e 2 (Microligado) exclusivamente relacionadas as características de estampabilidade de cada liga conformada.

10.CONCLUSÕES

Através dos testes conduzidos foi possível concluir que a liga 2 (Microligado) apresentou maior estampabilidade se comparada a liga 1 (C-Mn). Isso ocorre principalmente devido a um maior valor do expoente de encruamento “n” da liga 2 se comparada com a liga 1 (0,16 e 0,12 respectivamente), além de uma microestrutura mais favorável para conformação presente na liga 2 (inclusões globulares com carbonetos esferoidizados e tamanho de grão 5), em comparação com a liga 1 (inclusões alongadas com presença de perlita e tamanho de grão 9).

O processo de laminação a frio aplicado diminuiu a variação de espessura do material laminado a quente contribuindo para um melhor controle do nível de rebarbas nos furos expandidos ao longo da estampagem das peças, fator de extrema relevância para o sucesso do projeto, uma vez que o nível de rebarbas nos furos que posteriormente serão conformados tem influência significativa no avanço das trincas durante processo de expansão do furo.

A melhora na conformação das peças com o uso da liga 2 é nítida quando comparadas as fotos das peças estampadas com o material C-Mn e Microligado presentes na figura 12. Salientando que foram usados os mesmos parâmetros de conformação conforme descrito no item 9.3.

11.AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as empresas Arcelor Mittal e Waelzholz Brasmetal, por terem cedido os equipamentos e mão de obra que tornaram possíveis o desenvolvimento e conclusão do projeto realizado.

Agradecimento especial aos Srs. Thomas Frank e Maurício Bomfim por incentivarem o desenvolvimento e difusão do trabalho desenvolvido.

12. References

- [1] TAKAHASHI, M. Sheet Steel Technology for the Last 100 Years : Progress in Sheet Steels in Hand with the Automotive Industry. v. 55, n. 1, p. 79–88, 2015.
- [2] NBR 6656:2016 - Bobinas e chapas laminadas a quente de aço acalmado com características especiais de propriedades mecânicas, conformabilidade e soldabilidade – Requisitos. p. 2-3.
- [3] ASTM E-45:2018 – Standard test methods for determining the inclusion content of steel, p. 7-8
- [4] ASTM E-112:2010 – Standard test methods for determining average grain size, p. 1-27
- [5] NBR 6673:1981 – Produtos planos de aço – determinação das propriedades mecânicas a tração, p. 1-22.

Previsão de fratura prematura em aços multifásicos durante flangeamento de borda

Lucas Salomao Peres ¹, João Henrique C. Souza ², Gilmar Ferreira Batalha ³

¹ Department of Mechatronics and Mechanical Systems Engineering, Polytechnic School of Engineering - University of São Paulo, Av. Prof. Mello Moraes, 2231, Cidade Universitária, São Paulo, SP, 05508-900, Brazil, lucassalomaoperes@gmail.com ;

² Engineering School, Postgraduate Program of Mechanical Engineering, Federal University of Rio Grande, Av. Italia, km 8 - Bairro Carreiros, Rio Grande, RS, 96203-900, Brazil, joah_cs@hotmail.com .

³ Department of Mechatronics and Mechanical Systems Engineering, Polytechnic School of Engineering - University of São Paulo, Av. Prof. Mello Moraes, 2231, Cidade Universitária, São Paulo, SP, 05508-900, Brazil, gfbatalh@usp.br ;

Resumo

A maioria das falhas em estampagem de chapas metálicas resulta da ultrapassagem do limite de estrição, sendo denominadas falhas de conformabilidade global. Dentro de um contexto mais amplo, este é o tipo de falha possível de prever através das tecnologias de simulação numérica e caracterização de materiais disponíveis hoje. No entanto, existem condições importantes que promovem a fratura antes mesmo do desenvolvimento inicial de uma estrição. Essas são de particular preocupação, uma vez que tais fraturas atualmente não podem ser previstas ou antecipadas com base em técnicas convencionais de análise da Curva Limite de Conformação (CLC) e de viscoplasticidade. O presente trabalho trata de uma iniciativa voltada ao desenvolvimento de metodologias de investigação que possibilitem melhorar a previsibilidade de falhas causadas por trincas prematuras em situações de estiramento em bordas de componentes de chapas.

1. Introdução

Conforme exposto em um documento oficial da World Auto Steel [1], publicado em 2017, as montadoras estabelecem objetivos múltiplos, visando atender às atuais exigências legislativas e de mercado. Estes incluem a minimização de custos e a otimização da segurança, almejando ao mesmo tempo a redução de emissões de carbono e o aprimoramento da performance em situações de colisão. O controle rigoroso do ciclo de vida de automóveis e peças também é uma prioridade, assim como o incremento da rigidez estrutural para minimizar torções, promover maior conforto e assegurar a eficiente conformabilidade dos materiais utilizados. Além disso, busca-se incessantemente a redução do tempo e da especialização requeridos durante os processos de fabricação e montagem, para promover uma produção mais ágil e eficiente. Tais iniciativas são

imperativas para adequar-se às crescentes demandas e padrões normativos, possibilitando a entrega de produtos inovadores e sustentáveis ao mercado.

Para alcançar os objetivos delineados pelos fabricantes de veículos, um dos elementos vitais é o crescente emprego de aços de alta resistência [2]. Na Figura 1 é possível observar a previsão do uso de vários materiais comparando-se o ano de 2010 com o potencial esperado para 2050.

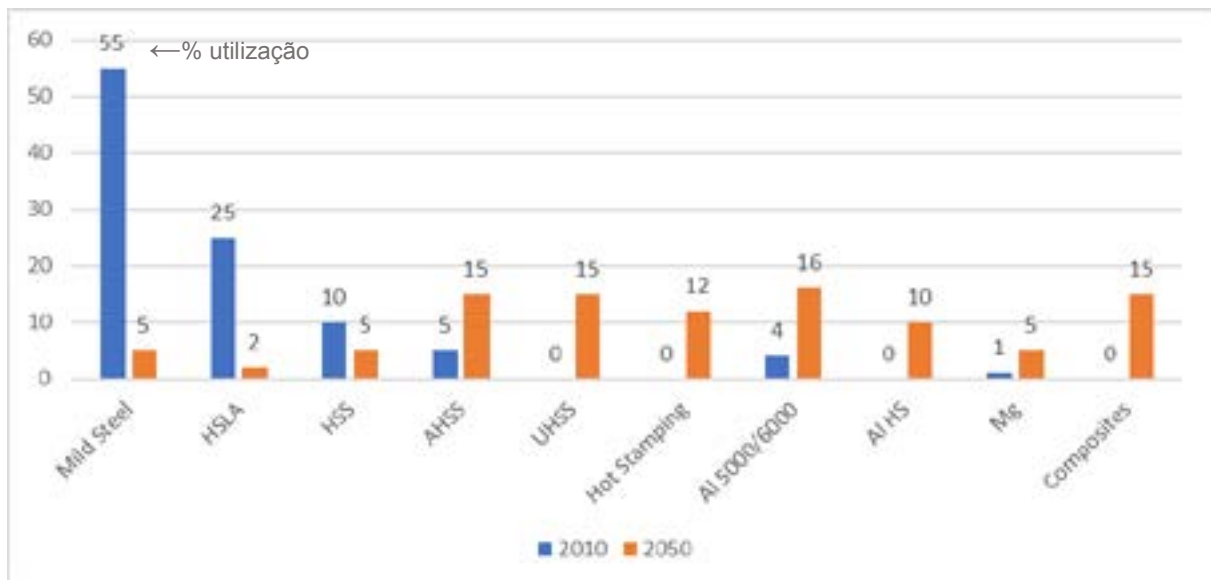


Figura 1: Porcentual de aplicação de materiais em veículos automotores, comparando 2010 com 2050 (Adaptado de [1]).

Nesse escopo é possível observar um grande crescimento no uso das ligas de alta resistência, principalmente de aços de estampagem a quente, chegando a 12% da massa do carro, 15% para aços avançados de alta resistência (AHSS) e 15% para aços de ultra alta resistência (UHSS).

Um ponto que é possível observar está relacionado ao aumento do limite de resistência que tende a ser inversamente proporcional ao alongamento. Na Figura 2 é possível entender as relações entre o limite de resistência e o alongamento dos principais grupos de aço utilizados hoje em chapas automotivas.

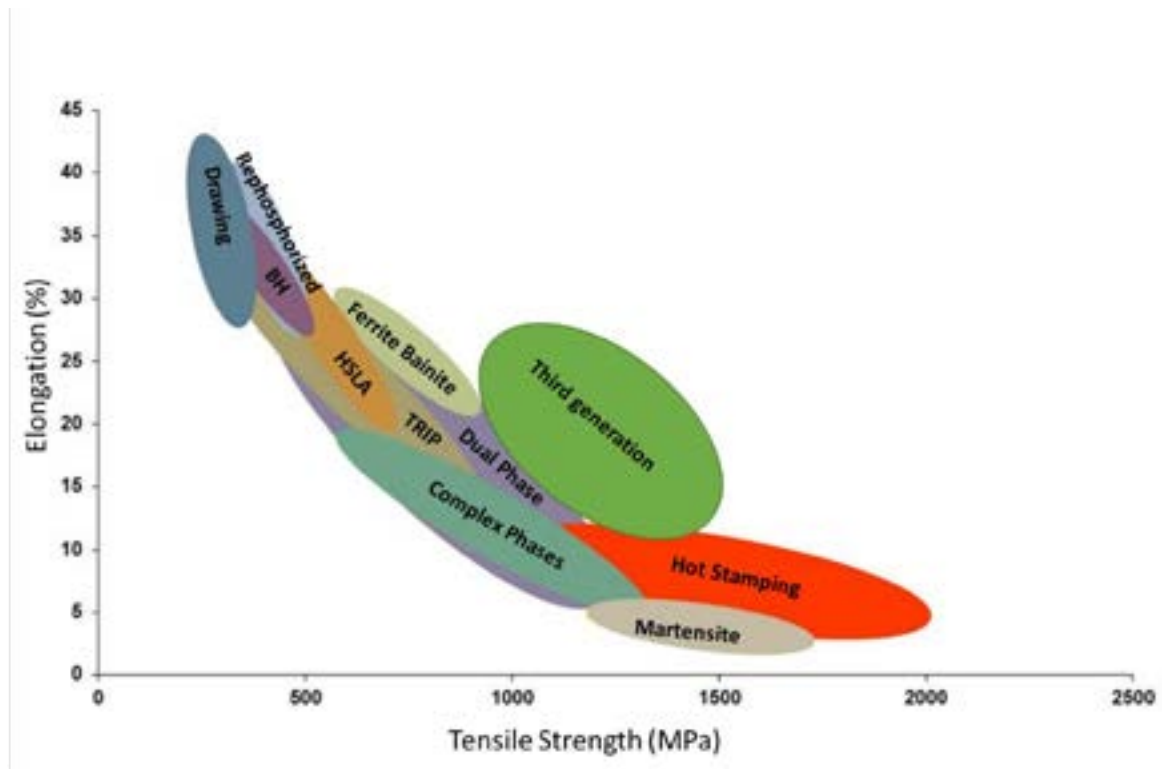


Figura 2: Graus de diferentes tipos de aço, relacionando os respectivos limites de resistência com seus alongamentos [1].

No entanto, as indústrias fabricantes de componentes estampados confrontam-se com aços detentores de elevada complexidade microestrutural [3]. Os materiais mais resistentes e ao mesmo tempo com boa conformabilidade estão no meio do diagrama na Figura 2, caracterizados por Ferrita-Bainita, TRIP, Complex Phase, Dual Phase e terceira geração, todos compostos por mais de uma fase, ferrita mais martensita, austenita ou bainita, ou todas elas. TRIP e Terceira Geração têm outro fator à equação, a transformação de fase induzida por deformação, de austenita para martensita. Apesar desses desafios, com o avanço e refinamento das técnicas, foi possível conquistar uma significativa redução de custos por peça, além de satisfazer requisitos de redução de massa, estruturais e de segurança essenciais.

2. Conformabilidade Global vs. Local

Historicamente, a maioria dos fabricantes precisava considerar apenas a conformabilidade global ao projetar e estampar peças. Estiramento, tração no plano e formação esticada são modos de formação “globais”, onde a deformação ocorre no plano da chapa sobre regiões relativamente grandes de material. Falhas por tração ou por estricção, onde o aço vai afinando progressivamente durante a formação, são características de falhas de conformabilidade global. As tensões em uma peça estampada começam baixas e uniformemente distribuídas, mas começam a se concentrar à

medida que o punção se aproxima do ponto morto inferior. O afinamento crítico (também chamado de estricção) ocorre se as tensões induzidas pela forma da peça e pelo processo de formação excederem o limite de conformação do metal escolhido. Pacotes de software de simulação de formação têm mostrado de forma confiável a capacidade de prever com precisão preocupações de conformabilidade global e pontos críticos com o uso de entradas como dados de teste de tração e a curva de limite de formação correta.

Entretanto, os chamados modos de falha de conformabilidade local são uma condição de falha completamente diferente, onde fraturas ocorrem fora do plano da chapa em resposta à deformação concentrada criada ao formar características localizadas como flanges estiradas, furos expandidos ou dobras em um raio muito pequeno para a classe de aço selecionada [4]. Essas falhas geralmente ocorrem sem qualquer afinamento ou estrangulamento observável (Figura 3). Softwares de simulação de conformação que consideram apenas a curva de limite de formação ou o afinamento máximo como critérios de falha não pode prever falhas de conformabilidade local [5].



Figura 3: Uma fratura relacionada à insuficiente conformabilidade local. Note a falta de afinamento próximo à fratura [4].

As condições de corte e as tensões de borda desenvolvidas em operações de corte e separação desempenham um papel significativo na limitação da conformabilidade local. As folgas do aço de corte, os ângulos de cisalhamento, os materiais do aço de corte, a afiação e o design da ferramenta, a direção de laminação do aço e as considerações de design da peça são todos importantes [5]. A fratura prematura de borda é atualmente o problema mais desafiador para especialistas em estampagem, e diversos trabalhos de pesquisa visam desenvolver metodologias mais confiáveis para sua previsão [6].

3. Flangeabilidade

A flangeabilidade pode ser definida como a capacidade do material de aumentar ou reduzir o perímetro das bordas através de uma tensão aplicada a ela, sem o aparecimento de ruptura [7]. Na Figura 4 estão presentes os principais modelos de flangeamento de bordas.

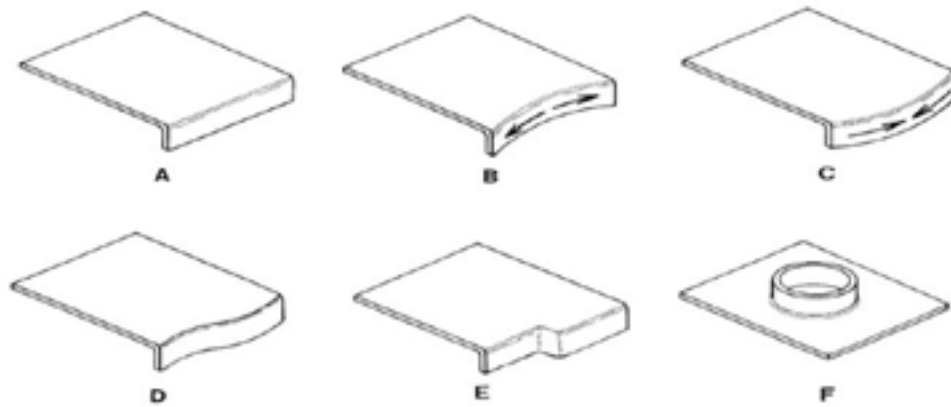


Figura 4: Operações que caracterizam a conformabilidade de bordas. As formas básicas de flangeamento (A, B e C) e flangeamento combinado (D, E e F) [8].

De acordo com [3] o método de expansão de furo é muito útil para comparar materiais multifásicos. Esse processo pode simular o modelo de flangeamento do tipo F conforme mostrado na Figura 4. Esse procedimento foi inicialmente desenvolvido em 1929 no “Kaiser Wilhelm Institute” (KWI), por Siebel e Pomp. A influência da qualidade das bordas no resultado do ensaio fez com que os pesquisadores desenvolvessem um sistema que iniciasse a trinca na borda durante a expansão de furo circular. Esse teste foi finalmente normatizado pela ISO 16630 [9]. Em um teste de expansão de furo, as tensões na borda do furo em expansão seguem um caminho de deformação uniaxial até atingir o limite de fratura. Em aços de menor resistência com bordas limpas, usinadas (sem danos), razões de expansão acima de 300% podem ser possíveis. Como mencionado acima, aços de alta resistência têm um limite de fratura menor. Ainda assim, a qualidade da borda tem uma influência muito grande no resultado do ensaio de expansão de furo. Operações de corte como corte por cisalhamento danificam as bordas e diminuem o limite de fratura, significando que o limite de fratura pode ser atingido mesmo com tensões mais baixas (Figura 5).



Figura 5: Aços de alta resistência têm um intervalo menor entre a Curva Limite de Formação de Pescoço e a Curva Limite de Fratura (adaptado de [1]).

4. Teorias de dano

Essas teorias são baseadas no entendimento de que nenhum material é perfeitamente contínuo. De acordo com Griffith [9], a deformação de vazios dentro dos materiais aumenta a tensão interna dentro da matriz cristalina. Esse aumento da tensão pode, além disso, ser influenciado pela nucleação, coalescência e crescimento dos vazios. Os métodos de avaliação usando modelos de fratura dúctil e instabilidade plástica como critérios foram propostos por Yoshida H. et al (2013) [10]. Também segundo Gross e Seeling [11], danos podem ser iniciados pela nucleação, crescimento e coalescência de microvazios. Os limites de grão e diferentes fases ou inclusões podem ser uma barreira ao movimento de discordâncias, resultando na nucleação de uma trinca. Anderson [12], baseado nas observações, diz que a nucleação do vazio é mais rápida sob tensões de triaxialidade elevadas. A nucleação do vazio em grandes partículas é facilitada pelo aumento do número de defeitos que causam iniciações de trinca. Orowan [13] explicou que a teoria de Griffith para sólidos com comportamento frágil não podia ser aplicada a materiais com comportamento dúctil. O mesmo autor observou que os testes de laboratório mostraram que o clivamento em uma fratura de aço pode aumentar em taxas de deformação lentas, diferentemente do material frágil que cresce rápido. Há uma deformação plástica significativa devido às restrições plásticas que resultam em fratura por clivamento. A fratura do aço pode começar com trincamento dúctil seguido por deformação plástica considerável. Orowan não conseguiu ajustar a teoria de Griffith para incluir plasticidade. Anos depois, baseado na teoria de Orowan, Irwin [14] aprimorou teorias existentes. Irwin observou deformações plásticas extensas em testes de raios-X, destacando a falha na teoria de Griffith. Irwin (1961) estruturou a análise usando a energia de deformação armazenada, a energia de superfície, e o trabalho para deformação plástica. A análise foi baseada no balanço de energia definido por Griffith.

Com base nesse princípio, Cockcroft-Latham [15] formula a teoria do estresse principal máximo, usando fratura multiaxial relacionada ao fluxo de trinca. Cockcroft-Latham (1968) propôs o critério de fratura de energia, que afirma que a fratura depende do integral do estresse de tração principal. Assim, para um dado material, este critério sugere que a fratura ocorre quando o integral do estresse de tração atinge o valor crítico.

Posteriormente, a fórmula foi modificada por Oh, Chen e Kobayashi [16], propondo que é possível incluir um fator material que influencia a mecânica do dano no processo de desenho. D_i é uma constante que representa a trabalhabilidade do material (1). A relação entre o material e a microestrutura é expressa na Equação 1 por C_{val} ; $\bar{\epsilon}_p^{-f}$ é a deformação plástica equivalente na fratura, $\bar{\epsilon}_p$ é uma deformação plástica equivalente, σ é o estresse.

$$D_i = \frac{1}{C_{val}} \int_0^{\bar{\epsilon}_p^{-f}} f(\sigma) d\bar{\epsilon}_p \quad (1)$$

Lee (2005) compara sete critérios de fratura:

Modelo Bao-Wierzbicki: é o melhor adaptado à maioria dos testes mecânicos devido à calibração de Lee em seu estudo;

- Estresse de Cisalhamento Máximo: similar à condição de rendimento de Tresca, mas usando o estresse crítico de cisalhamento, não o estresse de fluxo de cisalhamento;
- Cockcroft-Latham: como explicado anteriormente, capturou melhor o processo de formação de trinca;
- Modelo de Wilkins, também baseado no valor crítico e na dimensão crítica, que deve ser calibrado para cada teste designado;
- Critério de fratura de Johnson-Cook, postula que a fratura é uma função da triaxialidade do estresse, temperatura e taxa de deformação, mas é bom para expressar o processo de carregamento de triaxialidade não constante;
- Critério de Fratura de Deformação Equivalente Constante: para atingir a deformação plástica atinge um valor crítico para fratura;
- O Diagrama de Limite de Formação de Fratura, baseado na relação entre o estresse máximo e o mínimo, é muito usado nos processos de estampagem para entender as zonas críticas para o processo de ferramentaria, mas é, no entanto, inadequado para dar informações sobre o início da trinca [17].

5. Estudos de dano em materiais multifásicos

A concentração de tensão que ocorre na interface entre as fases microestruturais duras e moles destaca por que alguns graus ainda têm tensões críticas mais baixas. Do ponto de vista do material, os aços DP são propensos à nucleação de microtrincas devido à incompatibilidade de

deformação das fases de martensita e ferrita e à concentração de tensão devido a irregularidades morfológicas. Contudo, frequentemente, as microtrincas podem ser substancialmente atenuadas por deformação localizada e endurecimento em ferrita, e, assim, os aços DP não falham de uma maneira catastrófica e frágil. Os processos de dano são dinâmicos, e assim, um incidente de fissuração de martensita pode se assemelhar a um incidente de descoesão martensita-ferrita devido a a subsequente deformação plástica da ferrita ao redor da trinca nucleada. Uma complexidade adicional surge da natureza 3D da iniciação e crescimento do dano [10].

O teste de expansão de furo parte do princípio que deve ser interrompido imediatamente após o início da primeira trinca visível, como pode ser observado na Figura 6. O tempo da percepção do início da trinca e a desligar o equipamento é o tempo de iniciar novas trincas. Todas as imagens aqui mostradas são referentes ao DP980 após a expansão de furo.



Figura 6: Amostras depois do ensaio de expansão de furo e região amostrada (Fonte: o Autor).

As trincas são o resultado da nucleação, coalescência e crescimento dos vazios como exposto por Kim *et al.* [37]. Na Figura 7 é possível observar uma amostra da região de propagação da trinca e aplicando o *zoom* nessa região é possível verificar o crescimento dos vazios perpendiculares a propagação da trinca (Figura 8).

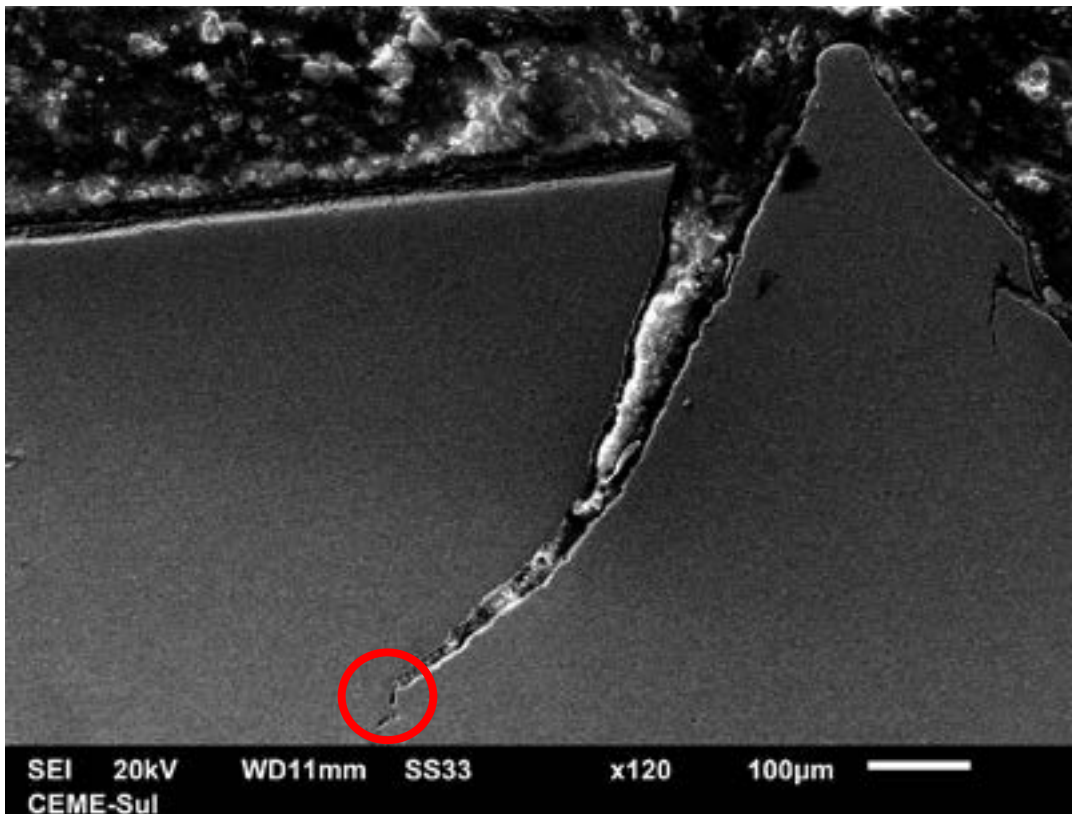


Figura 7: Região ampliada em vermelho para visualização da formação de vazios (Fonte: o Autor).

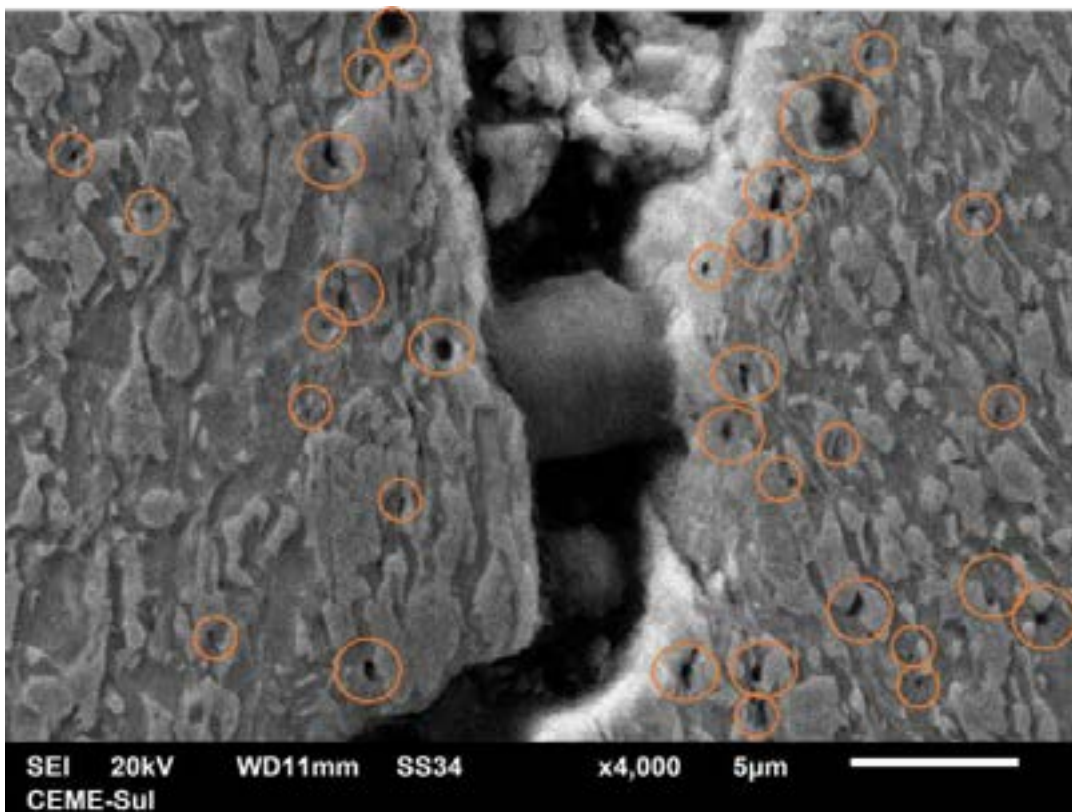


Figura 8: crescimento do vazio próximo a trinca no DP980 (Fonte: o Autor).

Quando visto com detalhes é possível verificar que os vazios sempre crescem ao redor da martensita conforme mostrado na Figura 9 e de forma mais macro na figura 10.

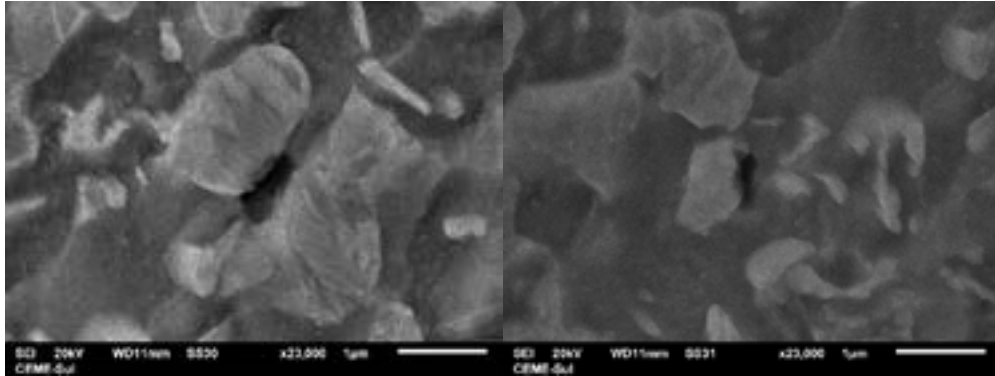


Figura 9: Formação dos vazios ao redor da martensita (Fonte: o Autor)..

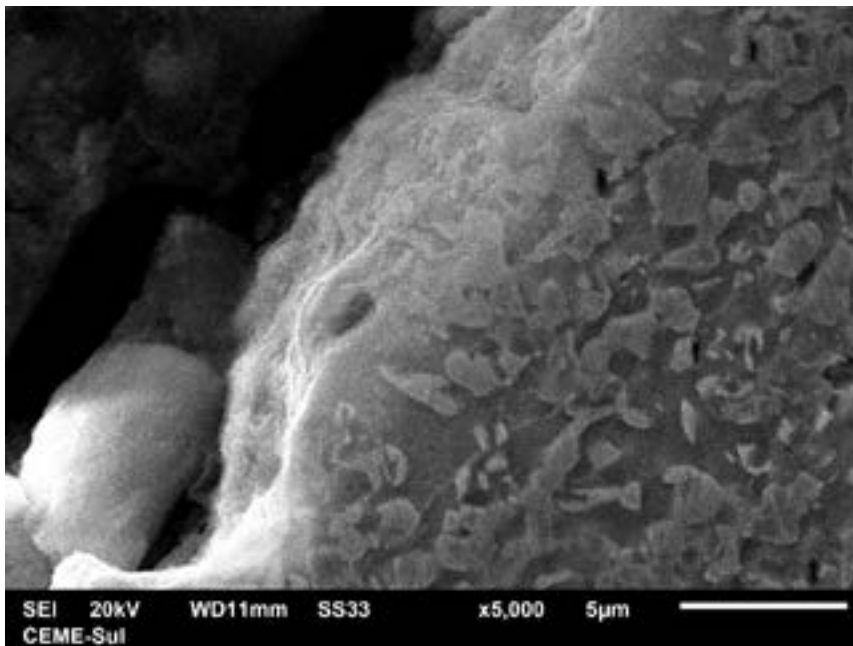


Figura 10: Formação dos vazios (Fonte: o Autor).

Raabe [3] mostrou que existe uma redução de performance na expansão de furo quando se utiliza aços multifásicos. Esse fenômeno é explicado por um fator microestrutural de formação de vazios, observado durante seus estudos com o DP980 sobre tensão uniaxial. Esses autores estudaram a formação dos vazios nas regiões intersticiais entre os grãos de ferrita e martensita

muito similar ao que foi encontrada na Figura 11, no qual há um vazio se formando ao longo da martensita.

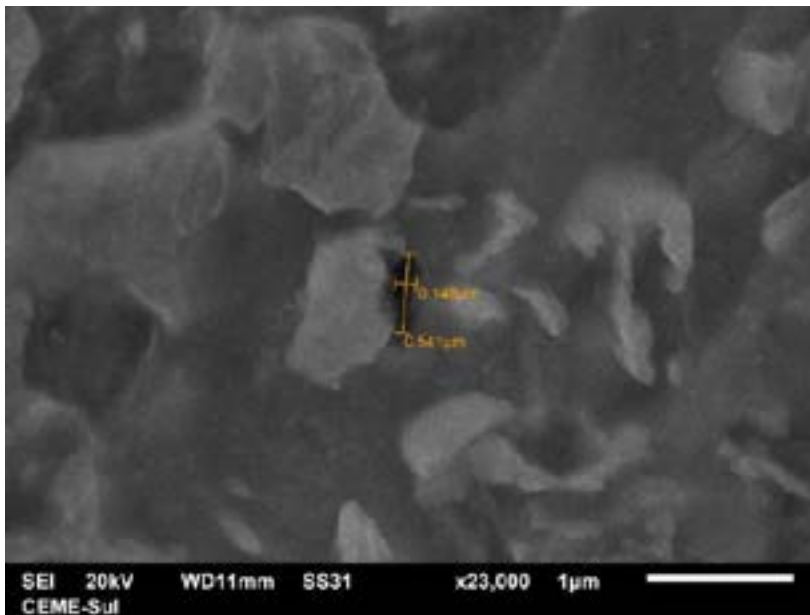


Figura 11: formação de vazios entre as estruturas e suas dimensões (fonte: autor).

6. Perspectivas para trabalhos futuros

Conceitos analíticos e ferramentas numéricas para prever o comportamento mecânico de materiais bifásicos foram aplicados ao caso específico do aço DP já em 1974 [11]. Uma maneira de classificar as abordagens existentes para examinar a influência da microestrutura nas propriedades mecânicas dos aços DP é avaliar o objetivo e a escala da simulação [10]. Como ilustrado na **Figura 12**, as abordagens utilizadas se enquadram em três categorias [12, 13]. Primeiro, previsões do desempenho de partes estruturais e etapas críticas de fabricação são conduzidas usando propriedades de material médias. Tais simulações focam principalmente em operações de conformação da chapa [12-21]. Segundo, a modelagem da mecânica do aço DP visando a previsão da resposta global do material, tipicamente curvas tensão-deformação e características de encruamento, como uma função das características microestruturais subjacentes e texturas herdadas [17-24]. Terceiro, simulações que abordam a resposta mecânica local dos aços. Nesta escala, a origem física e microscópica para o comportamento dos aços DP é examinada. Enquanto o contraste de fase é geralmente considerado, efeitos de segunda ordem, como orientação, propriedades de interface e gradientes em fase/em grão, são examinados [25-36].

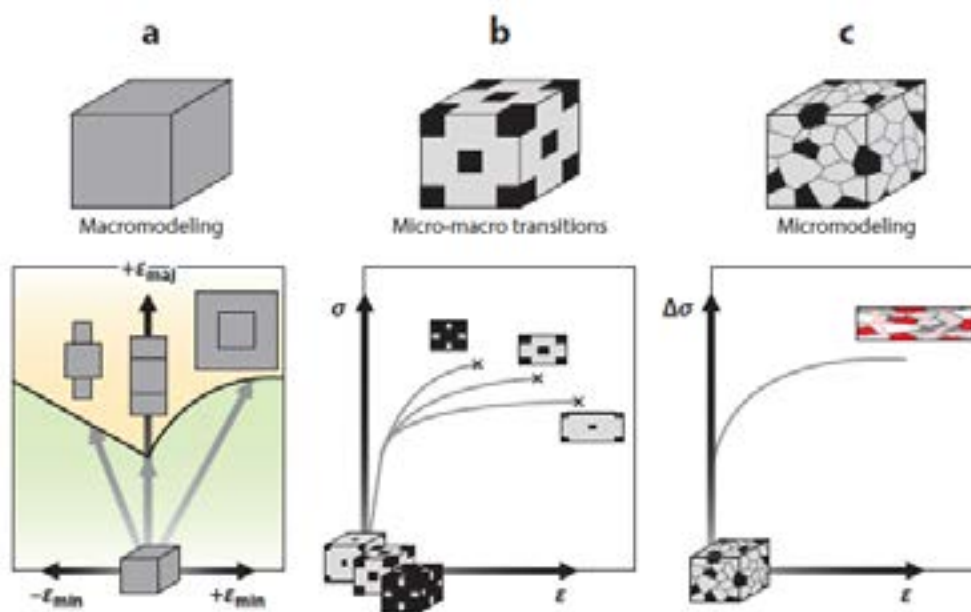


Figura 12: Classificação das três abordagens mencionadas. (a) Macromodelagem na escala de componente, utilizando a CLC. (b) A micro/ macro modelagem visa prever curvas de escoamento e características de encruamento. (c) Micromodelagem da textura e microestrutura para investigar micromecânica. A figura mostra a distribuição de tensão entre martensita e ferrita. Fonte: [10].

A conformabilidade de aços de alta resistência avançados, como aços dual-phase e complex-phase, é afetada por fatores microestruturais, como a distribuição de martensita e outros aspectos da microestrutura. Isso influencia a resistência ao estiramento e a capacidade de expansão de furos. Avanços em diversas ferramentas e técnicas experimentais estão abrindo caminho para uma melhor compreensão da (i) estrutura cristalográfica e defeitos e (ii) química local em aços multifásicos. Modelagem micromecânica e simulações computacionais podem desempenhar um papel importante na previsão do comportamento desses materiais durante processos de conformação em pesquisas futuras.

7. Referências

- [1]. KEELER, S. *et al.*, “Advanced High-Strength Steels Application Guidelines”, Version 6, WordAutoSteel, 2017, Brussels, Belgium. 116 p.
- [2]. Banu M.; Cao J., “Opportunities and Challenges in Metal Forming for Light Weighting: Review and Future Work”. ASME. J. Manuf. Sci. Eng. v.142, n. 11, pp. 110813 (24 pages). 2020. <https://doi.org/10.1115/1.4047732>.

- [3]. Raabe, D. et al. Current Challenges and Opportunities in Microstructure-Related Properties of Advanced High-Strength Steels, *Metallurgical and Materials Transactions A*, v. 51, pp. 5517–5586, 2020.
- [4]. N. Habibi, T. Beier, H. Richter, M. Könemann, and S. Münstermann, “[The effects of shear affected zone on edge crack sensitivity in dual-phase steels](#),” *IDDRG 2019, 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 651 012073, doi:10.1088/1757-899X/651/1/012073.
- [5]. Pathak, N. et al. Damage Evolution in Complex-Phase and Dual-Phase Steels during Edge Stretching Materials. *Basel*. v.10 (4), pp. 346-374. 2017. doi: 10.3390/ma10040346
- [6]. Paul, S. K., “A critical review on hole expansion ratio”, *Materialia*, v. 9, pp. 100566, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2019.100566>.
- [7]. Ferreira, J.L.; Tepedino, J.O.A.; Wolff, M. A. Evaluation of the Effect of Clearance on Cutting Edge Quality and Flanging Capacity of IF, HSLA and Dual Phase Steels (in Portuguese), *SAE International Congress, Brazil*, 2013.
- [8]. SMITH & ASSOCIATES. Forming Flanges and Process Limitations. Disponível em: <<https://pdf4pro.com/cdn/forming-flanges-amp-process-limitations-smith-amp-1d7164.pdf>>. Acesso em: 25 de setembro de 2023.
- [9]. ISO 16630, Metallic materials – Sheet and strip – Hole expanding test, 2^o edition, Geneva, Switzerland, 2017.
- [10]. Tasan *et Al.*, “An Overview of Dual-Phase Steels: Advances in Microstructure-Oriented Processing and Micromechanically Guided Design”, *Annu. Rev. Mater. Res.* 2015. 45:391–431. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070214-021103>.
- [11]. Karlsson B, Sundström BO. 1974. Inhomogeneity in plastic deformation of two-phase steels. *Mater. Sci. Eng.* 16(1–2):161–68.
- [12]. Helm D, Butz A, Raabe D, Gumbsch P. 2011. Microstructure-based description of the deformation of metals: theory and application. *JOM* 63(Apr.):26–33.
- [13]. Raabe D, Klose P, Engl B, Imlau KP, Friedel F, Roters F. 2002. Concepts for integrating plastic anisotropy into metal forming simulations. *Adv. Eng. Mater.* 4(4):169–80.
- [14]. Huh J, Huh H, Lee CS. 2013. Effect of strain rate on plastic anisotropy of advanced high strength steel sheets. *Int. J. Plast.* 44:23–46.
- [15]. Wang W-R, He C-W, Zhao Z-H, Wei X-C. 2011. The limit drawing ratio and formability prediction of advanced high strength dual-phase steels. *Mater. Des.* 32(6):3320–27.
- [16]. Firat M. 2012. A finite element modeling and prediction of stamping formability of a dual-phase steel in cup drawing. *Mater. Des.* 34:32–39

- [17]. Thomser C, Uthaisangasuk V, Bleck W. 2009. Influence of martensite distribution on the mechanical properties of dual phase steels: experiments and simulation. *Steel Res. Int.* 80(8):582–87
- [18]. Marvi-Mashhadi M, Mazinani M, Rezaee-Bazzaz A. 2012. FEM modeling of the flow curves and failure modes of dual phase steels with different martensite volume fractions using actual microstructure as the representative volume. *Comput. Mater. Sci.* 65:197–202
- [19]. Ramazani A, Mukherjee K, Pahl U, Bleck W. 2012. Transformation-induced, geometrically necessary, dislocation-based flow curve modeling of dual-phase steels: effect of grain size. *Metall. Mater. Trans. A* 43(10):3850–69
- [20]. Brands D, Schröder J, Balzani D, Dmitrieva O, Raabe D. 2011. On the reconstruction and computation of dual-phase steel microstructures based on 3D EBSD data. *PAMM* 11(1):503–4
- [21]. Liedl U, Traint S, Werner E. 2002. An unexpected feature of the stress–strain diagram of dual-phase steel. *Comput. Mater. Sci.* 25(1–2):122–28
- [22]. Asgari SA, Hodgson PD, Yang C, Rolfe BF. 2009. Modeling of advanced high strength steels with the realistic microstructure–strength relationships. *Comput. Mater. Sci.* 45(4):860–66
- [23]. Paul SK, Kumar A. 2012. Micromechanics based modeling to predict flow behavior and plastic strain localization of dual phase steels. *Comput. Mater. Sci.* 63:66–74
- [24]. Paul SK. 2013. Real microstructure based micromechanical model to simulate microstructural level deformation behavior and failure initiation in DP 590 steel. *Mater. Des.* 44:397–406
- [25]. Paul SK. 2013. Real microstructure based micromechanical model to simulate microstructural level deformation behavior and failure initiation in DP 590 steel. *Mater. Des.* 44:397–406
- [26]. Kadkhodapour J, Butz A, Ziaei-Rad S, Schmauder S. 2011. A micromechanical study on failure initiation of dual phase steels under tension using single crystal plasticity model. *Int. J. Plast.* 27(7):1103–25
- [27]. Sun X, Choi KS, Soulami A, Liu WN, Khaleel MA. 2009. On key factors influencing ductile fractures of dual phase (DP) steels. *Mater. Sci. Eng. A* 526(1–2):140–49
- [28]. Sodjit S, Uthaisangasuk V. 2012. Microstructure based prediction of strain hardening behavior of dual phase steels. *Mater. Des.* 41:370–79
- [29]. Kadkhodapour J, Schmauder S, Raabe D, Ziaei-Rad S, Weber U, Calcagnotto M. 2011. Experimental and numerical study on geometrically necessary dislocations and non-homogeneous mechanical properties of the ferrite phase in dual phase steels. *Acta Mater.* 59(11):4387–94

- [30]. Choi S-H, Kim E-Y, Woo W, Han SH, Kwak JH. 2013. The effect of crystallographic orientation on the micromechanical deformation and failure behaviors of DP980 steel during uniaxial tension. *Int. J. Plast.* 45:85–102
- [31]. Woo W, Em VT, Kim E-Y, Han SH, Han YS, Choi S-H. 2012. Stress–strain relationship between ferrite and martensite in a dual-phase steel studied by in situ neutron diffraction and crystal plasticity theories. *Acta Mater.* 60(20):6972–81
- [32]. Chen P, Ghassemi-Armaki H, Kumar S, Bower A, Bhat S, Sadagopan S. 2014. Microscale-calibrated modeling of the deformation response of dual-phase steels. *Acta Mater.* 65:133–49
- [33]. Ghassemi-Armaki H, Chen P, Bhat S, Sadagopan S, Kumar S, Bower A. 2013. Microscale-calibrated modeling of the deformation response of low-carbon martensite. *Acta Mater.* 61(10):3640–52
- [34]. Katani S, Ziaei-Rad S, Nouri N, Saeidi N, Kadkhodapour J, et al. 2013. Microstructure modelling of dual-phase steel using SEM micrographs and Voronoi polycrystal models. *Metallogr. Microstruct. Anal.* 2(3):156–69
- [35]. Ramazani A, Ebrahimi Z, Prahl U. 2014. Study the effect of martensite banding on the failure initiation in dual-phase steel. *Comput. Mater. Sci.* 87:241–47
- [36]. Vajragupta N, Uthaisangsk V, Schmaling B, Münstermann S, Hartmaier A, Bleck W. 2012. A micromechanical damage simulation of dual phase steels using XFEM. *Comput. Mater. Sci.* 54:271–79
- [37]. Kim JH, Lee MG, Kim D, Matlock DK, Wagoner RH. 2010. Hole-expansion formability of dual-phase steels using representative volume element approach with boundary-smoothing technique. *Mater. Sci. Eng. A* 527(27–28):7353–63



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil
26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

TAILOR ROLLED BLANKS: TECNOLOGIA INOVADORA PARA OTIMIZAR PROPRIEDADES E REDUZIR O PESO DE PEÇAS ESTAMPADAS

André Rosiak ⁽¹⁾
Lirio Schaeffer ⁽²⁾

RESUMO

A indústria automotiva tem realizado esforços significativos para potencializar a segurança e reduzir o peso dos veículos. Um dos principais desenvolvimentos é o conceito Tailor Rolled Blank (TRB). Os TRBs são produtos semiacabados produzidos sob medida, com variações locais de espessura. A tecnologia envolve a produção de chapas com diferentes espessuras e transições suaves em um processo de laminação flexível, eliminando a necessidade de soldas e proporcionando vantagens significativas. Diante da relevância desta tecnologia, este artigo apresenta o estado da arte em pesquisas científicas relacionadas ao tema. A revisão apresenta o potencial da tecnologia e as oportunidades para futuras investigações científicas.

Palavras-chave: Tailor Rolled Blank, Indústria automotiva, Laminação Flexível.

ABSTRACT

The automotive industry has made significant efforts to enhance safety and reduce vehicle weight. One of the primary developments in this regard is the Tailor Rolled Blank (TRB) concept. TRBs are semi-finished products tailored with local variations in thickness. The technology involves producing sheets with varying thicknesses and smooth transitions using a flexible rolling process, eliminating the need for welds and offering substantial advantages. Given the relevance of this technology, this article presents the state of the art in scientific research related to the topic. The review highlights the potential of the technology and opportunities for future scientific investigations.

Keywords: Tailor Rolled Blank, Automotive Industry, Flexible Rolling.

⁽¹⁾ Mestre em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Centro Brasileiro de Inovação em Conformação Mecânica, Brasil.

⁽²⁾ Professor, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil (

1. INTRODUÇÃO

Com o aumento do número de automóveis, a escassez de energia e a poluição tornaram-se problemas urgentes a serem resolvidos. A vista disso, a indústria automotiva sofre crescente pressão para reduzir o peso dos veículos. Dessa forma, é possível ampliar a eficiência do consumo de combustíveis e, paralelamente, reduzir as emissões de gases com efeito estufa. A redução de 100 kg em um veículo de passeio permite uma redução no consumo de combustível de cerca de 0,35 l/100km e uma redução de 8,4 g/km de emissões de CO₂ [1].

Devido a regulamentos de segurança mais rigorosos, além da proteção ambiental, a resistência ao choque dos veículos também é um fator chave no projeto automotivo. No entanto, garantir a resistência estrutural do veículo é um problema técnico desafiador no projeto de construção leve. A fim de alcançar um design leve sem reduzir o desempenho de segurança dos veículos, um grande número de pesquisas e desenvolvimentos tem sido propostos pela indústria automotiva para adaptar o setor à atual tendência atual.

A solução tradicional para otimizar simultaneamente o peso e a resistência ao choque dos automóveis envolve a utilização de aços avançados de alta resistência (Advanced High Strength Steels - AHSS), materiais compósitos, ligas leves e materiais avançados na carroceria [2]. Esta abordagem demonstrou potencial para reduzir a massa do veículo em até 39% em comparação com o projeto convencional [3]. Contudo, os altos preços desses materiais têm dificultado a aplicação em larga escala [4]. Para resolver esse problema, algumas tecnologias de fabricação avançadas foram desenvolvidas.

Dentre as tecnologias recentemente desenvolvidas e aplicadas pela indústria automotiva está o Tailor Rolled Blank (TRB). Este tema tem recebido grande atenção de pesquisadores e da indústria nos últimos anos. Destarte, este artigo apresenta o estado da arte em pesquisas científicas relacionadas ao TRB. A revisão apresenta o potencial da tecnologia e as oportunidades para futuras investigações científicas.

2. TAILOR BLANKS

As estruturas convencionais que compõem um projeto automotivo são produzidas de um material único e possuem espessura uniforme. Contudo, os componentes dos automóveis suportam cargas muito complexas, o que implica que diferentes regiões devem ter funções diferentes para maximizar o desempenho e a utilização de material. Obviamente, as estruturas convencionais de espessura uniforme não exploram todo o potencial de resistência ao choque e redução de peso. Para solucionar o problema, as denominadas “peças sob medida” ou Tailor Blanks, foram desenvolvidas e amplamente aplicadas na indústria automotiva [5].

Os denominados Tailor Blanks são produtos semiacabados produzidos sob medida, com variação local de espessura e/ou propriedades do material [6]. Atualmente, o conceito pode ser dividido em quatro subgrupos (Figura 1): Tailor Weded Blanks, Blanks Patchwork, Tailor Rolled Blanks e Tailor Heat Treated Blanks.

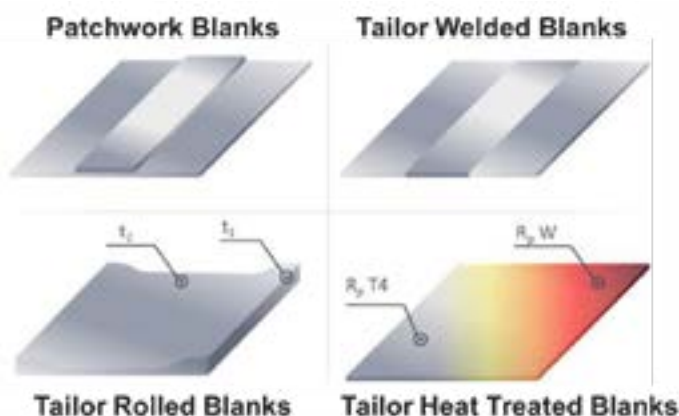


Figura 1: Classificação dos conceitos de blanks sob medida [7].

O termo *Tailor Weded Blanks* (TWB) refere-se a peças fabricadas a partir de chapas com diferentes materiais e espessuras por um processo de soldagem. A tecnologia de Blanks Patchwork envolve a integração de processos através da conformação simultânea da peça e do reforço. Já os

Tailor Heat Treated Blanks são peças que tem seu comportamento mecânico personalizado por tratamento térmico [2].

Estes produtos semiacabados possuem uma disposição das propriedades de acordo com a necessidade possibilitando, simultaneamente, o aprimoramento do desempenho e a redução do peso do produto final. O uso de *Tailor Blanks* também otimiza as rotas de fabricação. Em áreas que necessitam de espessura adicional para rigidez ou desempenho em caso de colisão, as abordagens convencionais exigem a estampagem da peça primária e um reforço adicional e, em seguida, a soldagem das duas peças. As peças sob medida incorporam diretamente a resistência e espessura necessárias e minimizam problemas de tolerância e ajuste devido a eliminação de operações de soldagem. Como resultado, os produtos sob medida apresentam melhor integridade dimensional reduzindo ruídos e vibrações.

A importância dos produtos sob medida pode ser dimensionada a partir de dados econômicos. O mercado global de *Tailor Blanks* foi avaliado em US\$ 3,7 bilhões em 2021. Estima-se que o mercado experimentará uma taxa de crescimento anual de 9,8% e atingirá US\$ 7,2 bilhões até 2028 [8]. A Figura 2 mostra o Audi A3 (8Y) que conta com diversos componentes fabricados a partir de estruturas sob medida.

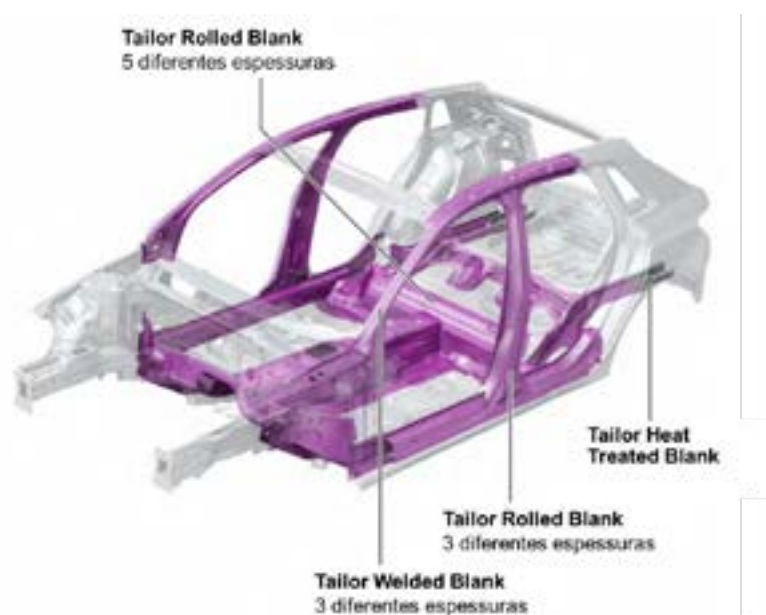


Figura 2: Componentes personalizados sob medida do Audi A3 (8Y) [9].

3. TAILOR ROLLED BLANK

As chapas soldadas sob medida representaram uma pequena revolução na indústria siderúrgica. A combinação de diferentes espessuras e ligas em uma única peça possibilitou um passo importante em direção à redução de peso. Em áreas que precisam suportar cargas mais baixas, o material pode ser economizado. Em áreas com solicitações mais altas, material suficiente ou outros tipos de materiais podem ser aplicados. Além da redução de peso, o número de peças também pode ser reduzido usando TWB [10].

As estruturas TWB fornecem uma combinação flexível de diferentes chapas e melhoram a eficiência na utilização de materiais. A tecnologia é amplamente adotada na coluna B [11] e no painel interno da porta [12] da carroceria do veículo (Figura 3).

Apesar de possibilitar grande liberdade construtiva, o TWB possui características que restringem sua aplicação. A principal dificuldade associada ao uso desta tecnologia é a conformabilidade limitada pela presença da solda. Foi demonstrado, que a conformabilidade dos TWBs é reduzida pela concentração de tensões geradas na junta soldada e que este efeito aumenta com a relação entre as espessuras [23]. MERKLEIN et al. (2014) relataram que o cordão de solda se move durante a estampagem, o que pode resultar em danos ao ferramental e quebra da junta soldada [20]. Além disso, a concentração de tensão na união entre os materiais que compõe o TWB também pode ser propensa a falhas por fadiga durante a aplicação final do produto [14].

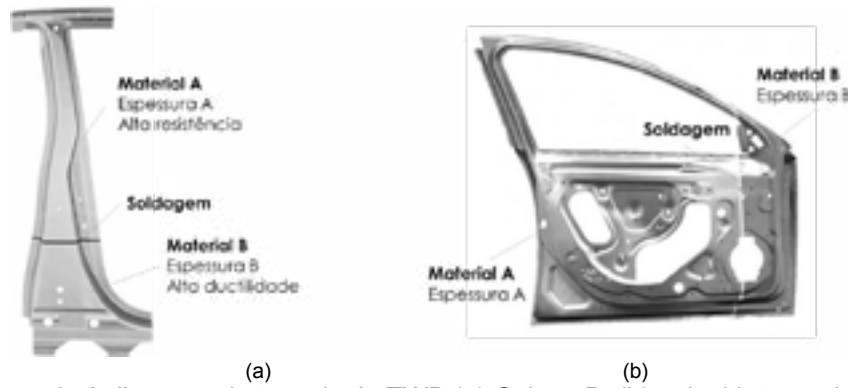


Figura 3: Aplicações da tecnologia TWB (a) Coluna B. (b) painel interno da porta.

Para superar estes problemas, no início dos anos 2000, foi desenvolvida a tecnologia de Tailor Rolled Blank (Figura 4). A tecnologia propõe a produção de chapas com diferentes espessuras e transições contínuas e suaves em um processo de produção que não deteriora a conformabilidade do material, a chamada laminação flexível. A ausência de cordões de solda elimina a introdução de zonas termicamente afetadas e resulta em melhor qualidade superficial em comparação ao TWB.

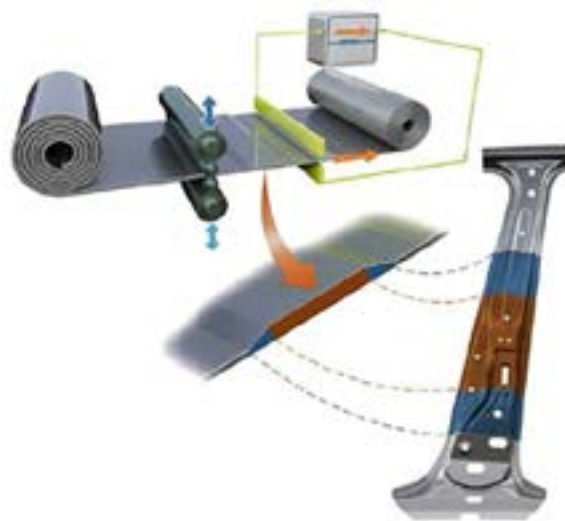


Figura 4: Desenho esquemático do processo de laminação flexível para obtenção de uma estrutura TRB [5].



Figura 4: Gama de peças de carroceria de veículos produzidas de estruturas TRB [10].

Hoje, o potencial do TRB já foi reconhecido, uma vez que há uma série de aplicações bem sucedidas na indústria, especialmente na indústria automotiva (Figura 4).

Em comparação com os TWBs, as chapas laminadas sob medida (TRB) apresentam as seguintes vantagens [10]:

- Um processo de produção mais curto;
- Os custos de produção do TRB são independentes do número de transições de espessura;
- O gradiente de espessura é livremente selecionável em uma ampla faixa e sua posição é menos dependente da estampagem profunda subsequente. Nas estruturas TWB a posição da solda sempre precisa ser cuidadosamente considerada no projeto da estampagem;
- Devido às transições lineares de espessura, o TRB não possui picos de tensão na transição de espessura;
- Devido às transições lineares de espessura, o desgaste da ferramenta é menor;
- Com a ausência de solda, a superfície não é afetada negativamente.

3.1 FABRICAÇÃO DE TRB

O processo aplicado para fabricar peças sob medida é a denominada laminação flexível. Comparado com outras tecnologias de laminação, este processo tem muitas vantagens. A laminação flexível resulta em uma espessura da chapa definida em largura, respectivamente na direção de laminação [15]. Em contraste com os TWBs e os *Blanks Patchwork*, as chapas laminadas sob medida têm uma transição contínua de espessura. Portanto, nenhuma concentração de tensão é gerada por transições repentinas de espessura, levando a uma boa conformabilidade [7].

O processo é caracterizado por um ajuste on-line da folga do rolo de laminação com base em um perfil de espessura alvo. Um algoritmo integrado realiza a comparação da variação de espessura do perfil online. Com o desvio apurado, o controle automático do medidor é modificado. Apenas algumas etapas de iteração são suficientes para produzir uma peça com uma distribuição de espessura definida em tolerâncias estreitas [10].

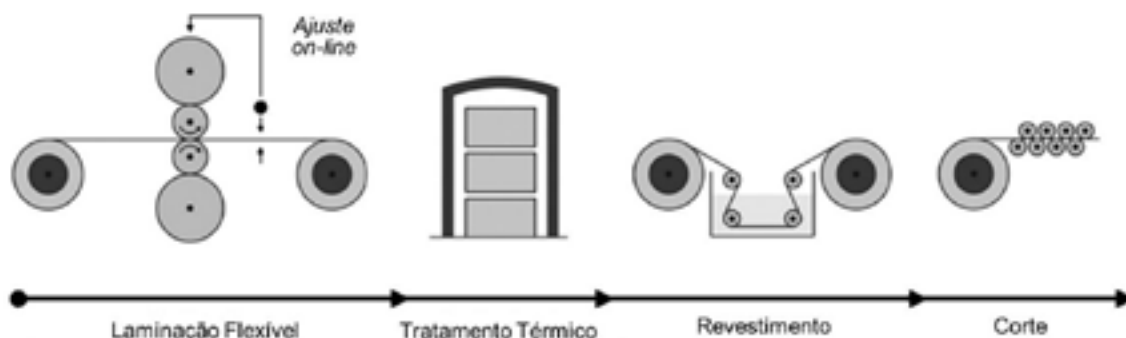


Figura 5: Desenho esquemático do processo de laminação flexível para obtenção de uma estrutura TRB [10].

O processo de laminação flexível pode ser realizado com uma precisão de espessura de até $\pm 0,05$ mm [10]. Atualmente, a empresa Mubea domina a tecnologia com capacidade de produzir 70.000 t/ano de TRB com largura máxima de até 750 mm. De acordo com HIRT et al. (2005) a transição mais econômica apresenta uma inclinação de 1:100. Após a laminação, é possível o processamento adicional das chapas. Um exemplo de cadeia de processo (Figura 5) inclui a (i) laminação flexível (ii) tratamento térmico (iii) revestimento anticorrosivo (iv) endireitamento e corte (v) estampagem. O tratamento térmico resulta em diferentes propriedades em regiões com espessuras variadas [7].

A laminação flexível no sentido latitudinal também é possível. Este processo, também denominado *Strip Profile Rolling* [15], utiliza um sistema de rolo especial que provoca um fluxo de material na direção latitudinal (Figura 6). No processo, o fluxo de material é influenciado pelo próprio material, pela redução do passe e pela redução total, bem como pela geometria da chapa e do rolo. As relações entre estes parâmetros são otimizadas para inibir o fluxo de material na direção longitudinal, o que causa defeitos de planicidade [7].

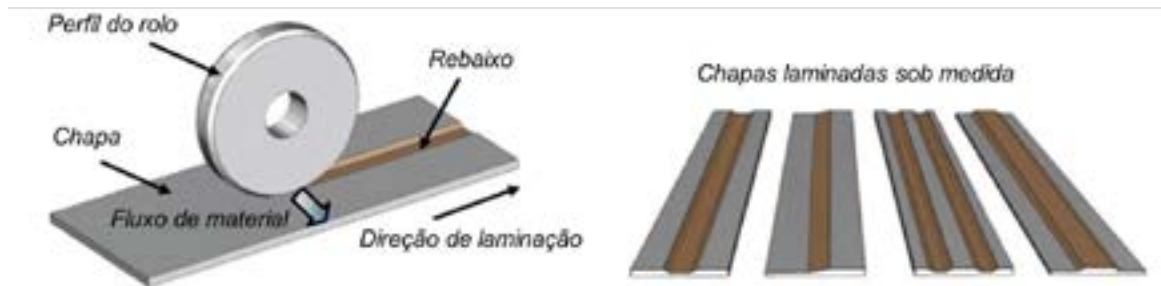


Figura 6: Desenho esquemático do processo de laminação flexível e diferentes estruturas TRB [17].

HAN et al. (2018) investigaram a laminação flexível com variações de espessura nas direções longitudinal e latitudinal para produzir a estrutura da porta de um veículo (Figura 7). Os autores verificaram que o processo de fabricação de tal TRB inevitavelmente gera rugas causadas por concentrações de deformação sobrepostas em ambas as direções. Contudo, a laminação flexível de chapas com furos circulares e quadrados reduzem a concentração de deformação. Dessa forma, é possível reduzir significativamente as rugas induzidas pelo processo, o que torna o processo proposto digno de estudo para a fabricação de TRB.

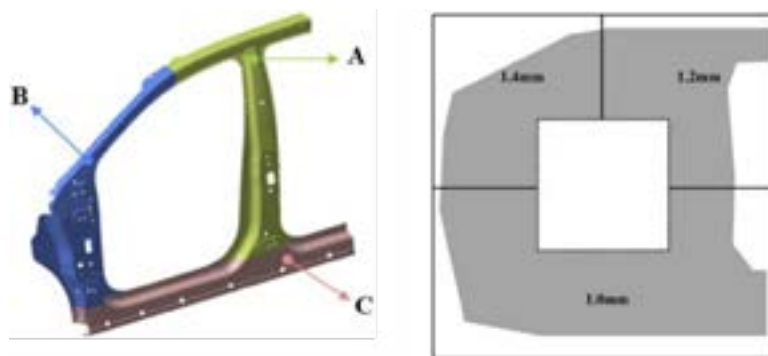


Figura 7: Estrutura da carroceria da porta e correspondente TRB [6].

A laminação flexível também pode ser aplicada na produção de chapas axissimétricas com espessamento circular. Este é o caso da laminação bidirecional proposta por HILDENBRAND et al. (2015) mostrada na Figura 8. Assim como em processos descontínuos como o flow forming, a laminação bidirecional possibilita a fabricação de peças individuais com espessuras variadas pode ser realizada [18]. No entanto, o flow forming permite apenas a produção de componentes ocios e simétricos axiais [19]. Usando o processo de laminação flexível, peças axissimétricas sob medida de diferentes materiais com transições circulares de espessura podem ser fabricados com uma maior resistência mecânica [20].

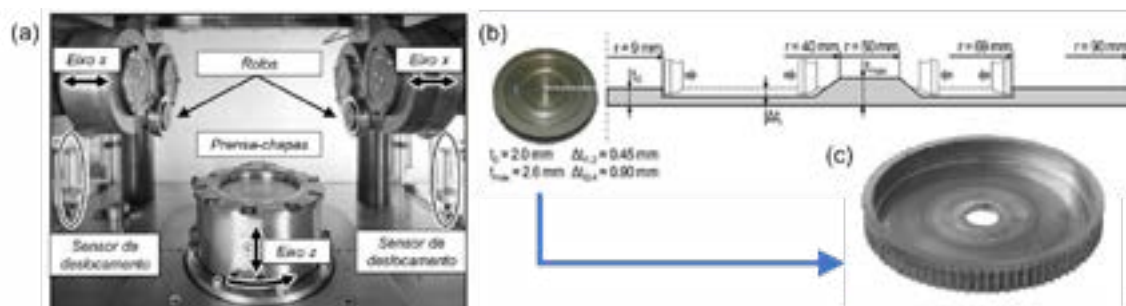


Figura 8: (a) Processo de laminação bidirecional, (b) Estrutura TRB e (c) peça final estampada [21].

3.2 CONFORMAÇÃO DE TRB

A conformação de chapas personalizadas com um gradiente de espessura, em vez de chapas convencionais, permite um controle mais eficiente do fluxo de material [21]. Como resultado, as estruturas TRB são menos propícias a fratura durante a estampagem em comparação a chapas com

espessura constante. Isso permite um aumento na profundidade de estampagem de peças feitas de TRB [10].

MEYER et al. (2008) analisaram a estampagem do aço H180Y na forma de chapas de espessura constante e de um TRB otimizado com distribuição de espessura de 0,7/1,2/0,7 mm. Como mostra a Figura 9, a estampagem do TRB resulta em deformações menos críticas. Como resultado, o uso do TRB aumenta a segurança do processo em 20%. Dessa forma, um aumento de até 19% da profundidade de embutimento pode ser obtida (Figura 10). Paralelamente, a tecnologia possibilita a redução de peso do componente de 9%.

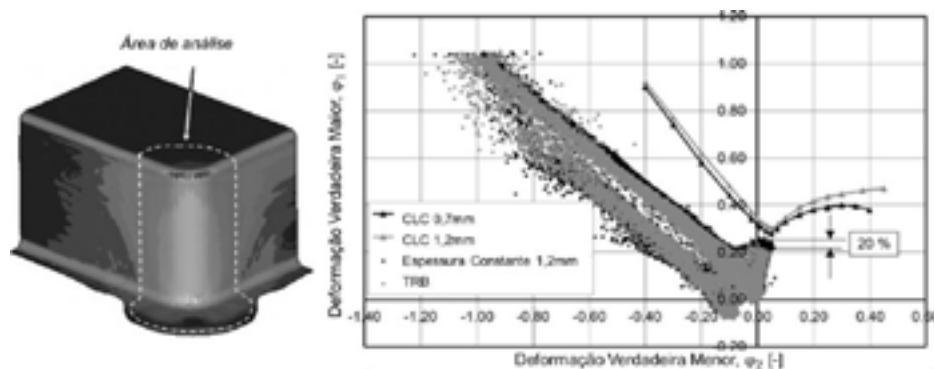


Figura 9: Comparação das deformações de um copo de 82 mm de profundidade feito de TRB e de uma chapa de espessura constante de 1,2 mm [10].



Figura 10: Comparação de um copo de 82 mm de profundidade feito de TRB e de uma chapa de espessura constante de 1,2 mm [10].

Apesar das vantagens mencionadas, a conformação de TRB requer alguns ajustes para que o processo seja bem sucedido. Ferramentas de estampagem convencionais, projetadas para peças com espessura constante, tendem a induzir a formação de defeitos durante a conformação de TRBs. Na estampagem, devido a distribuição da espessura, pode ocorrer a perda de contato entre a prensa-chapas e o TRB, resultando na formação de rugas no flange. Como mostra a Figura 11, as características da zona de transição de espessura também influenciam a tendência a formação de rugas [15].

A substituição do prensa-chapas convencional rígido por um sistema de prensa-chapas elástico reduz significativamente a formação de rugas. Um exemplo de sistema de prensa-chapas elástico é mostrado na Figura 12. Na construção multicamadas, o prensa-chapas com a geometria adaptada ao TRB é coberto por uma chapa metálica fina e temperada e uma placa especial de poliuretano [14]. HIRT et al. (2005) propuseram um sistema de prensa-chapas semelhante capaz de evitar a formação de rugas durante a conformação do TRB (Figura 13).

Com os ajustes adequados do ferramental, até mesmo um TRB com comprimento de transição curto pode ser estampado sem ocorrência de defeitos [22]. Neste caso, o comprimento e a orientação das transições de espessura não influenciam a conformabilidade do TRB [23]. Mesmo um movimento transversal severo da transição de espessura em relação ao prensa-chapas não representa nenhum risco de fratura do TRB.

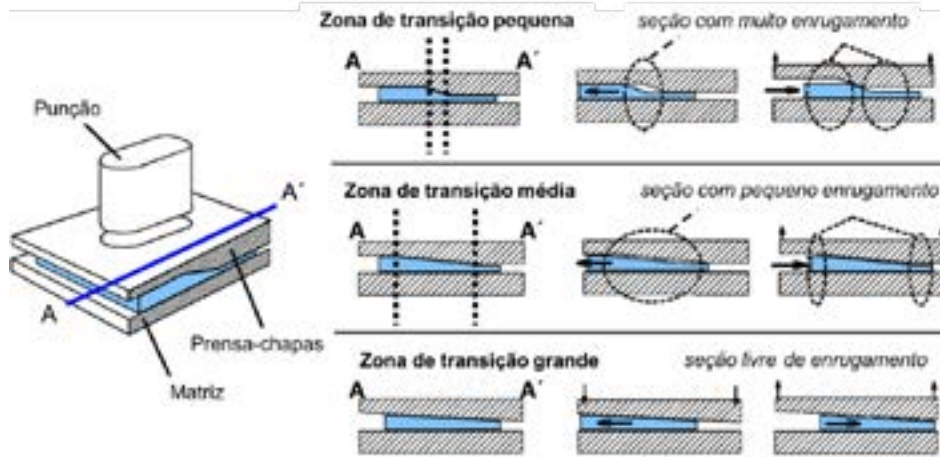


Figura 11: Estampagem profunda em TRBs. Dependendo do comprimento da transição ocorrem rugas [16].

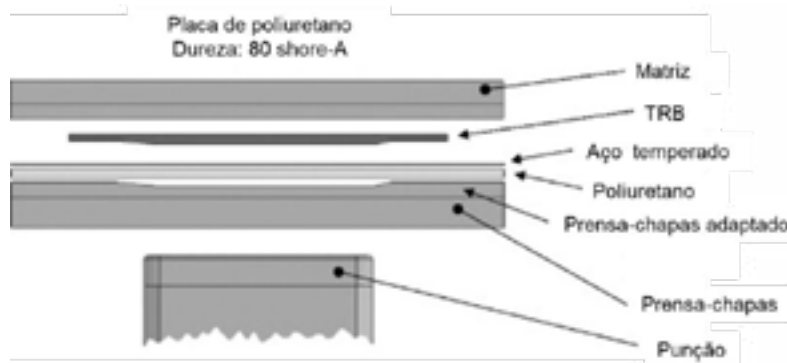


Figura 12: Esquema da conformação de uma estrutura TRB em ferramentas com prensa-chapas elástico [10].

MEYER et al. (2008) analisaram o efeito do comprimento, da posição e da orientação da transição de espessura na conformabilidade de TRBs (Figura 14). Simulações numéricas demonstraram que a orientação da transição de espessura não influencia significativamente a distribuição de deformação. Por outro lado, o comprimento e a posição afetam o estado de deformação do TRB. Segundo os autores, a distribuição de deformação mais favorável é alcançada para o maior comprimento de transição e quando a transição é posicionada na área do raio do punção.

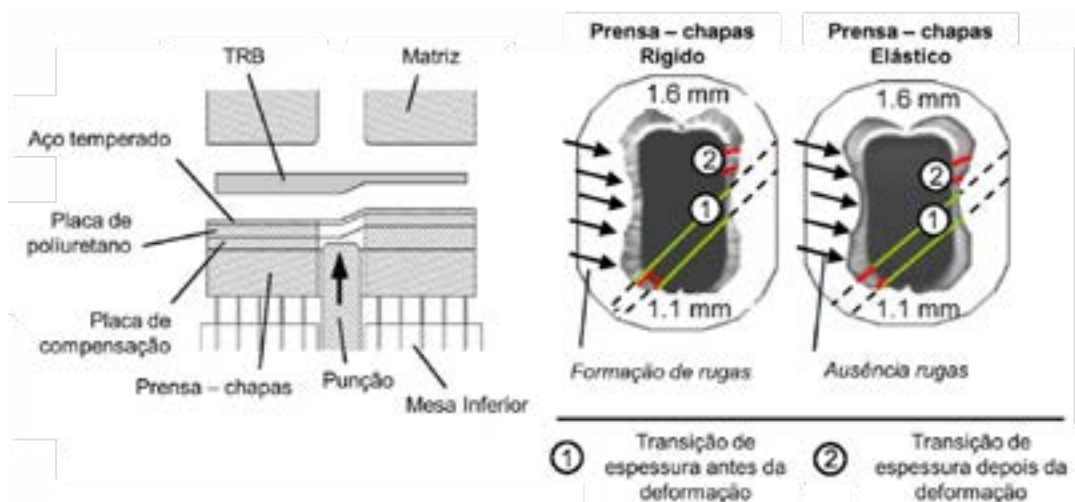


Figura 13: Estampagem profunda em TRBs aplicando um prensa-chapas elástico [16].

Além do ferramental, a capacidade de processamento dos TRBs em um processo subsequente de estampagem profunda também depende da conformabilidade residual das chapas laminadas sob

medida. Nesta análise é fundamental conhecer as relações entre as dimensões geométricas, a espessura, e a distribuição das propriedades mecânicas no TRB [21].

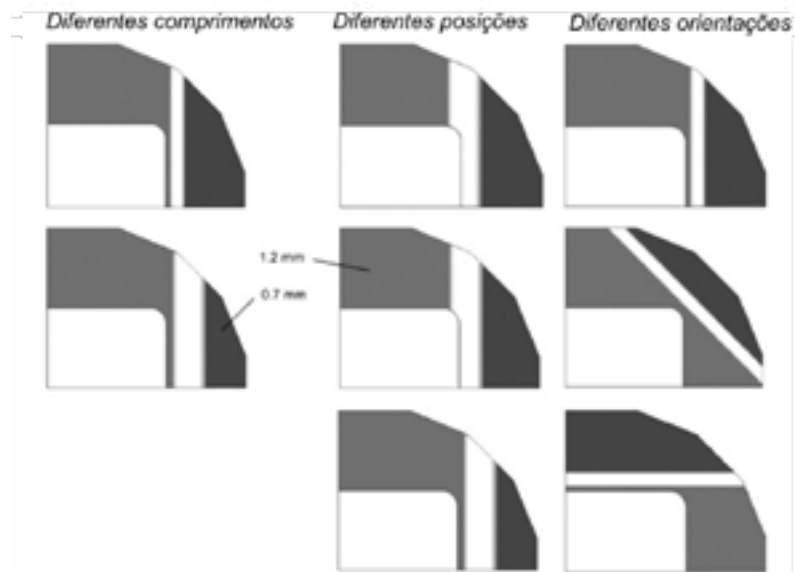


Figura 14: Análise da influência na distribuição de deformações com estruturas com diferentes comprimentos, posições e orientações de transição [10].

Um aspecto importante na estampagem de TRB é o retorno elástico. As regiões mais espessas e mais finas apresentam retorno elástico distinto. Uma forma de contornar este problema e garantir a qualidade dimensional do produto estampado é compensar o retorno elástico desigual através do movimento local dos segmentos da matriz em direção ao punção. A quantidade de movimento é definida pelas propriedades do material determinadas pelas curvas de escoamento e valor de espessura [16].

Os TRBs têm sido usados na estampagem a frio desde 2001 e, em 2006, começaram a ser conformados por estampagem a quente. Um exemplo típico desta aplicação é a coluna B (Figura 15). Exemplos de veículos com componentes TRB estampados a quente incluem: 2^a geração do BMW X5, Volvo S60 2010, Audi A6 2011, Ford Focus 2011, VW Golf VII 2012, Ford Kuga/Escape 2013, Peugeot 308 2014, Volvo XC90 2014 [24].

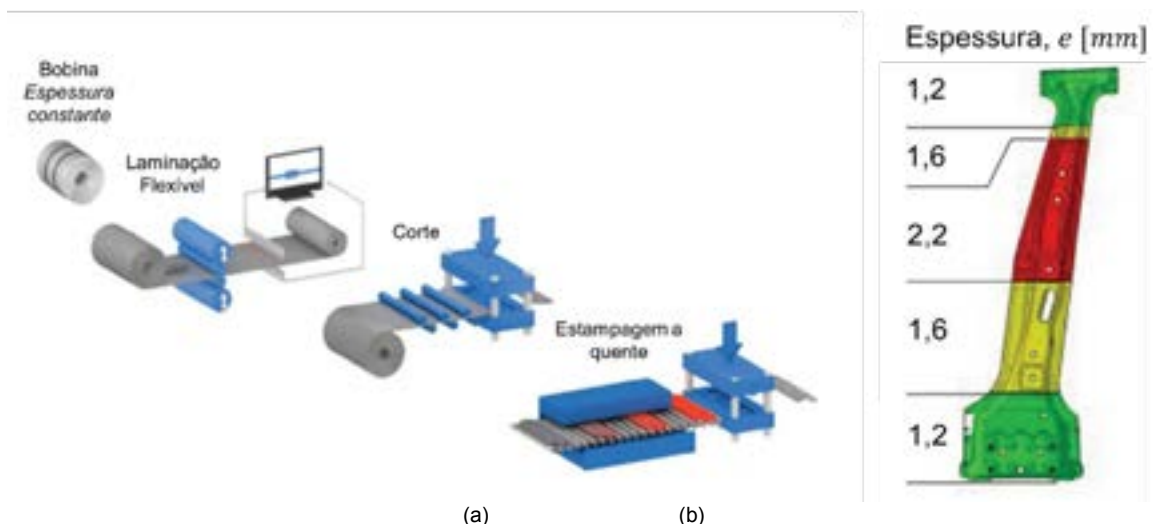


Figura 15: (a) Estampagem a quente de peças TRB (b) Coluna B do BMW X5 de 2^a geração [24].

3.3 PROJETO DE COMPONENTES TRB

O desempenho das peças TRB está intimamente relacionado à variação da espessura. Para atingir o melhor desempenho durante a estampagem e na aplicação final, metodologias de otimização de engenharia são inevitavelmente utilizadas para projetar as peças TRB.

A Figura 16 resume as principais etapas do projeto de componentes automotivos produzidos por TRB. Inicialmente, modelos de elementos finitos são utilizados para analisar a transmissão de carga durante a colisão. Dessa forma, é possível identificar as regiões que necessitam de maior espessura. Em seguida, modelos de elementos finitos com componentes TRB são estabelecidos para substituir as estruturas convencionais de espessura uniforme. Para este passo, é fundamental conhecer o comportamento mecânico do material em função da espessura. Com base no modelo de veículo com estruturas TRB, o desempenho de segurança do veículo é analisado. Um procedimento de otimização de projeto é implementado para aprimorar a resistência ao impacto e projeto leve do veículo. Com base em modelos e algoritmos de otimização o peso da estrutura TRB é reduzido e a absorção de energia é aumentada em relação ao projeto de espessura uniforme [4].

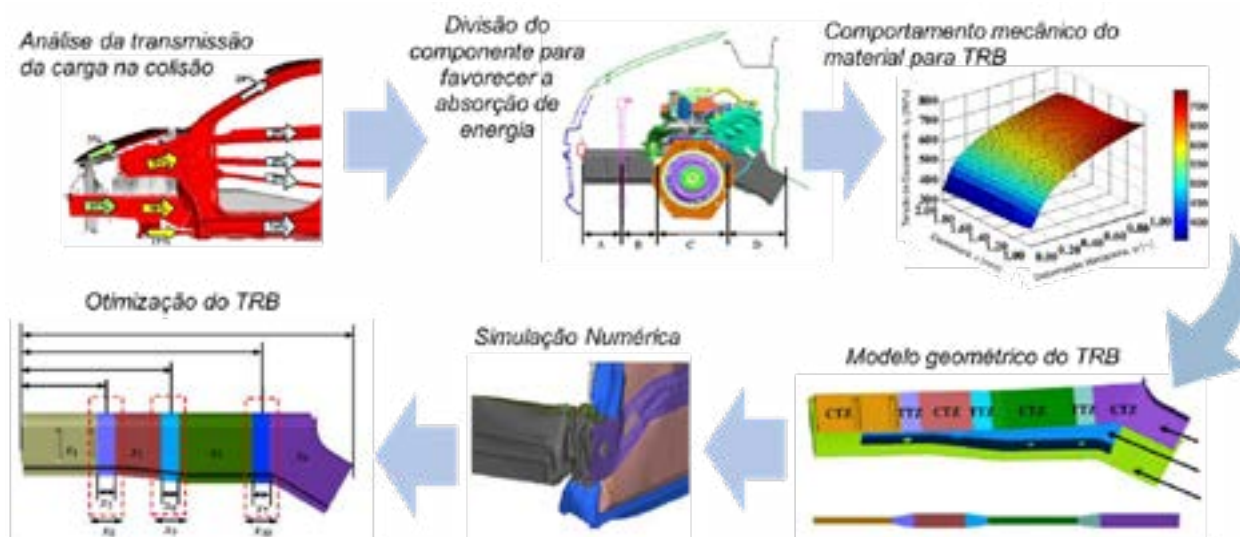


Figura 16: Principais etapas de um projeto de TRB [4].

Como mencionado, o conhecimento das propriedades mecânicas do material é fundamental para a produção do TRB. A Figura 17 mostra como as propriedades mecânicas e a curva de escoamento do aço HSLA340 variam de acordo com a espessura da chapa.

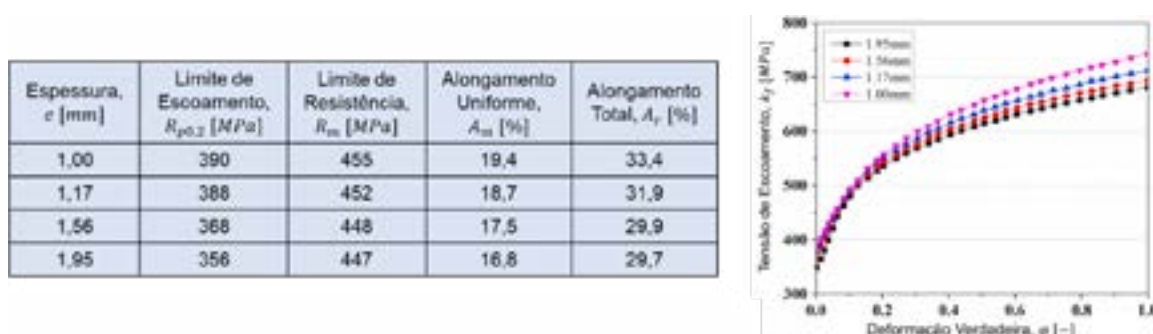


Figura 17: Influência da espessura nas propriedades e na curva de escoamento do aço HSLA340 [5].

3.4 APLICAÇÕES E DESENVOLVIMENTOS

No campo automotivo, diversos estudos aplicaram a tecnologia TRB com sucesso na otimização da resistência a colisões e na redução do peso de automóveis. CHUANG et al. (2008) aplicaram TRBs a seis componentes da parte inferior da carroceria, variando a distribuição da espessura dos componentes, mostrando que a tecnologia TRB tem grande potencial para melhorar o desempenho funcional do veículo e ao mesmo tempo que contribui para uma construção leve. LU et al. (2018) desenvolveram a caixa de colisão de automóveis usando a estrutura TRB, e a capacidade de absorção de energia foi efetivamente aumentada em comparação com os componentes tradicionais de espessura uniforme.

DUAN et al. (2016) analisaram o projeto de uma viga longitudinal dianteira de estrutura TRB sob impacto frontal. O resultado mostrou que o padrão de deformação do componente TRB pode influenciar muito o desempenho de segurança do veículo. A otimização da distribuição da espessura

do componente possibilitou uma redução de 15,2% da massa do componente, enquanto a absorção total de energia foi aumentada em 4,2% (Figura 18).



Figura 18: (a) Perfil otimizado de espessura da longarina dianteira. (b) Padrão de deformação do componente com a espessura da estrutura TRB otimizada [9].

YU et al. (2021) analisaram a aplicação da tecnologia TRB na fabricação dos componentes frontais de veículos de passeio (Figura 19) para a otimização do projeto de resistência e redução de peso. Os resultados mostram que, em comparação com o design de espessura uniforme, os componentes frontais com estruturas TRB são superiores em termos de resistência geral à colisão. O projeto TRB otimizado possibilitou um aumento de 8,73% da absorção total de energia e reduziu o peso dos componentes frontais em 12,8%.

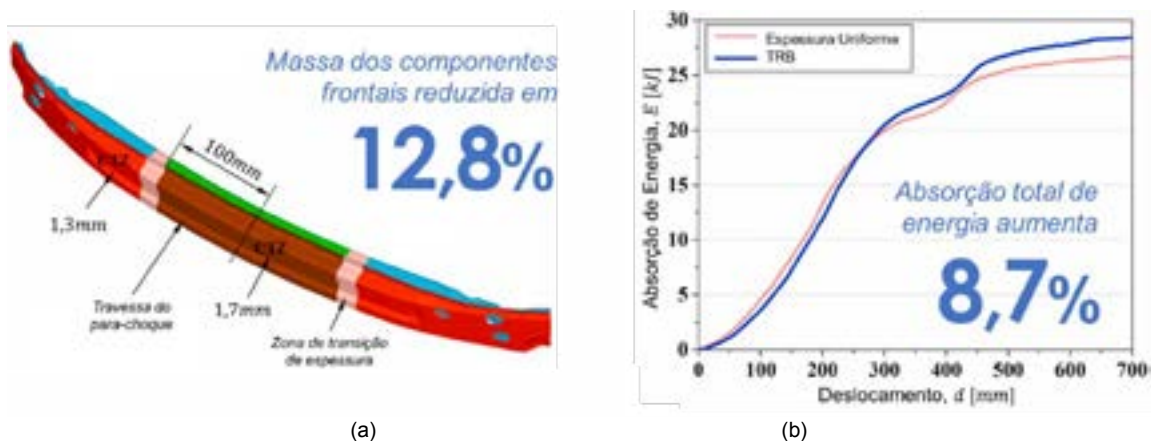


Figura 19: (a) Modelo dos componentes frontais com estrutura TRB. (b) Comparação da absorção total de energia entre o projeto de espessura uniforme e TRB [6].

YU et al. (2021) demonstraram que o TRB altera o padrão de deformação dos componentes durante as colisões. A Figura 20 mostra as deformações estruturais típicas da montagem dianteira do veículo sob impacto frontal total. Os padrões de deformação dos componentes frontais do veículo são comparados entre o projeto de espessura uniforme e o TRB. No projeto convencional, há uma deformação por flexão prematura, especialmente no lado direito, o que resulta diretamente em esmagamento axial insuficiente da caixa de colisão e da zona de colisão do componente. Enquanto para o design TRB, o componente se curva em um padrão de dobramento favorável e os padrões gerais de deformação das estruturas frontais do veículo são mais estáveis do que o design de espessura uniforme [6].

HILDENBRAND et al. (2015) investigaram a aplicação de TRBs na conformação maciça (com um fluxo de material tridimensional) para produzir anéis sincronizador em uma cadeia de processamento reduzida. Dois materiais foram analisados: o aço para estampagem profunda DC04 e o aço de alta resistência DP600. Os autores destacam que a orientação da área de maior espessura é um fator crucial no processo de conformação de TRB.



Figura 20: Modelo dos componentes frontal com estrutura (a) de espessura uniforme e (b) TRB.

4. CONCLUSÕES

Este artigo revisou a tecnologia *Tailor Rolled Blank* (TRB) e suas aplicações na indústria automotiva. O TRB é um conceito inovador que envolve a produção de peças semiacabadas com variações locais de espessura, permitindo a personalização das propriedades dos materiais. O uso de TRBs oferece várias vantagens, incluindo a redução de peso dos veículos, o aumento da segurança em caso de colisão e a simplificação dos processos de fabricação, ao eliminar a necessidade de soldas.

A revisão destacou que a tecnologia TRB já é amplamente aplicada na indústria automotiva, com exemplos de veículos que usam componentes TRB em suas estruturas. Estudos demonstraram que o uso de TRBs pode melhorar significativamente o desempenho de segurança dos veículos, aumentando a absorção de energia durante colisões e reduzindo o peso dos componentes. Além disso, foi ressaltada a importância do projeto adequado de componentes TRB, envolvendo análises de elementos finitos e otimização de engenharia para maximizar a resistência e a eficiência. Também foram abordados desafios relacionados à conformação de TRBs, como o retorno elástico desigual e a necessidade de ajustes no ferramental de estampagem.

Em resumo, o artigo destacou o potencial da tecnologia TRB na indústria automotiva para melhorar a segurança dos veículos, reduzir o peso e otimizar os processos de fabricação. Com um mercado global em crescimento e inúmeras aplicações bem-sucedidas, o TRB continua a ser uma área de pesquisa e desenvolvimento importante na busca por veículos mais seguros e eficientes.

REFERÊNCIAS

- [1] GOEDE M., STEHLIN M., RAFFLENBEUL L., KOPP G., BEEH E., Super light car-lightweight construction thanks to a multi-material design and function integration. *Eur Transp Res Rev* 1(1):15–20, 2019.
- [2] ZHANG W., XU J., Advanced lightweight materials for Automobiles: A review, *Materials & Design*, Volume 221, 2022.
- [3] LI Y., LIN Z., JIANG A., CHEN G., Use of high strength steel sheet for lightweight and crashworthy car body. *Mater Des* 24(3):177–182, 2003.
- [4] YU L., GU X., QIAN L., JIANG P., WANG W., YU M., Application of tailor rolled blanks in optimum design of pure electric vehicle crashworthiness and lightweight, *Thin-Walled Structures*, Volume 161, 107410, 2021.
- [5] DUAN L., SUN G., CUI J., CHEN T., CHENG A., LI G., Crashworthiness design of vehicle structure with tailor rolled blank, *Structural and Multidisciplinary Optimization* volume 53, pp. 321–338, 2016.
- [6] HAN S., HWANG T., OH I., CHOI M., MOON Y.H., Manufacturing of tailor-rolled blanks with thickness variations in both the longitudinal and latitudinal directions, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 256, pp. 172-182, 2018.
- [7] MERKLEIN M., JOHANNES M., LECHNER M., KUPPERT A., A review on tailored blanks—production, applications and evaluation, *J. Mater. Process. Technol.*, 214, pp. 151-164, 2014.
- [8] BUSINESS RESEARCH, Tailored Blank Market Size, Share, Growth, and Industry Analysis, By Type (Steel Tailored Blank, Aluminum Tailored Blank and Others), By Application (Passenger Vehicle,

- Commercial Vehicle and Others) Covid-19 Impact, Latest Trends, Segmentation, Driving Factors, Restraining Factors, Key Industry Players, Regional Insights, and Forecast From 2022 To 2030, 2023.
- [9]AUDI, Audi A3 (type 8Y), Self-study programme 680.
- [10]MEYER A., WIETBROCK B., HIRT G., Increasing of the drawing depth using tailor rolled blanks— Numerical and experimental analysis, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Volume 48, pp. 522-531, 2008.
- [11]PAN F., ZHU P., ZHANG Y., Metamodel-based lightweight design of B-pillar with TWB structure via support vector regression *Comput. Struct.*, 88 (1–2) pp. 36-44, 2010.
- [12]XU F., SUN G., LI G., LI Q., Crashworthiness design of multi-component tailor-welded blank (TWB) structures, *Struct. Multidiscip. Optim.*, 48 (3) pp. 653-667, 2013.
- [13]SCHULTE R., HILDENBRAND P., LECHNER M., MERKLEIN M., Designing, manufacturing and processing of tailored blanks in a sheet-bulk metal forming process, *Procedia Manuf.*, 10 (2017), pp. 286-297
- [14]SUN G., ZHANG H., LU G., GUO J., CUI J., LI Q., An experimental and numerical study on quasi-static and dynamic crashing behaviors for tailor rolled blank (TRB) structures, *Materials & Design*, Volume 118, pp. 175-197, 2017.
- [15]KOPP R., WIEDNER C., MEYER A., Flexibly Rolled Sheet Metal and Its Use in Sheet Metal Forming, *Advanced Materials Research* 6-8, 81-92, 2005.
- [16]G. HIRT, C. ABRATIS, J. AMES, A. MEYER, Manufacturing of sheet metal parts from tailor rolled blanks, *Journal for Technology of Plasticity*, 30, pp. 1-12, 2005.
- [17]HIRT G., DÁVALOS-JULCA D.H., Tailored profiles made of tailor rolled strips by roll forming - part 1 of 2. *Steel Res Int* 83(1):100–105, 2012.
- [18]MUSIC O., ALLWOOD J.M., KAWAI K., A review of the mechanics of metal spinning, *Journal of Materials Processing Technology* 210 1 3-23, 2010.
- [19]WONG C., DEAN T., LIN J., A review of spinning, shear forming and flow forming processes, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43, 14 1419-1435, 2003.
- [20]OPEL S., Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variabler Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blechmassivumformung, Erlangen, Meisenbach Verlag, 2013.
- [21]HILDENBRAND P., SCHNEIDER T., MERKLEIN M., Flexible Rolling of Process Adapted Semi-finished Parts and its Application in a Sheet-Bulk Metal Forming Process, *Key Engineering Materials*, 1662-9795, Vol. 639, pp 259-266, 2015.
- [22]MEYER A., HIRT G., Tailor rolled blanks—experimental and numerical analysis of the deep drawing behaviour *Proceedings of the International Deep Drawing Research Group*, Porto, pp. 421-428, 2006
- [23]GROCHE P., METZ C., Hydroforming of unwelded metal sheets using active-elastic tools, *Journal of Materials Processing Technology*, 168 (2), pp. 195-20, 2005.
- [24]BILLUR E., *Automotive Steels Design, Metallurgy, Processing and Applications*, 2017.
- [25]CHUANG C.H., YANG R.J., LI G., MALLELA K., POTHURAJU P., Multidisciplinary design optimization on vehicle tailor rolled blank design, *Struct. Multidiscip. Optim.*, 35 (6), pp. 551-560, 2008.
- [26]LU R., GAO W., HU X., LIU W., LI Y., LIU X., Crushing analysis and crashworthiness optimization of tailor rolled tubes with variation of thickness and material properties, *Int. J. Mech. Sci.*, 136, pp. 67-84, 2018



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil

26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis

12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

Análise numérica do desempenho de canais de resfriamento retos e conformais para aplicações de estampagem a quente

B.C.S. Silva ^(1, 2, 3)

L.F. Folle ^(1, 2)

L.F. Seixas ⁽²⁾

T.N. Lima ^(1, 2)

R.S. Coelho ^(1, 2)

G.F. Batalha ⁽³⁾

RESUMO

A necessidade de otimização dos processos de estampagem a quente gera uma oportunidade para utilização de novos conceitos de matrizes com canais conformais, o que requer métodos de fabricação mais avançados, como a manufatura aditiva. Contudo, a aplicação dessa tecnologia ainda apresenta desafios, como o entendimento minucioso do efeito das configurações dos canais em relação ao ciclo térmico do processo e do desempenho dos materiais processados por manufatura aditiva em relação aos aços ferramenta convencionais, como o H13. Esse trabalho tem como objetivo avaliar, via simulação numérica por elementos finitos, a eficiência de canais conformais durante o processo de estampagem a quente em um conceito de matriz demonstrativa. Foi utilizado o *software* Simufact Forming para analisar o desempenho dos conceitos de ferramentas projetadas com canais retos e conformais, considerando como materiais da ferramenta o aço H13 fabricado convencionalmente e o maraging 300 processado por fusão em leito de pó a laser. Os resultados das simulações evidenciaram que, para uma geometria simples, a aplicação de canais conformais possibilita melhor distribuição térmica ao longo das matrizes. Embora apresentem diferenças nas propriedades térmicas e mecânicas, os materiais apresentaram desempenho muito similar nas simulações preliminares. No entanto, um aprofundamento considerando o efeito da rugosidade dos canais impressos no escoamento do fluido de refrigeração necessita ser realizado.

Palavras-chave: Estampagem a quente, canais conformais, elementos finitos, manufatura aditiva.

⁽¹⁾ Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, Brasil.

⁽²⁾ SENAI CIMATEC - Instituto SENAI de Inovação (ISI) em Conformação e União de Materiais (SENAI CIMATEC ISI C&UM), Salvador, Brasil.

⁽³⁾ Universidade de São Paulo - Escola Politécnica, São Paulo, Brasil.

ABSTRACT

The need to optimize hot stamping processes creates an opportunity to use new die concepts with conformal channels, which requires more advanced manufacturing methods, such as additive manufacturing. However, the application of this technology still presents challenges, such as a detailed understanding of the effect of channel configurations in relation to the thermal cycle of the process and the performance of materials processed by additive manufacturing in relation to conventional tool steels, such as H13. This work aims to evaluate, via finite element numerical simulation, the efficiency of conformal channels during the hot stamping process in a demonstrative die concept. The Simufact Forming software was used to analyze the performance of tool concepts designed with straight and conformal channels, considering conventionally manufactured H13 steel and maraging 300 processed by laser powder bed fusion as the tool material. Simulation results showed that, for a simple geometry, the application of conformal channels allows for better thermal distribution throughout the dies and the formed sheet. Although they present differences in thermal and mechanical properties, materials showed very similar performance in preliminary simulations. However, further studies considering the printed channels roughness effect on the cooling fluid flow need to be carried out.

Keywords: Hot stamping, conformal channels, finite elements, additive manufacturing.

1. INTRODUÇÃO

A estampagem a quente direta é um processo de conformação de chapas metálicas no qual a etapa de conformação e têmpera ocorrem simultaneamente [1,2]. Dentre os parâmetros envolvidos nos processos de estampagem a quente, o controle do resfriamento é uma das características que demandam maior atenção. Fatores como a qualidade da peça final, a eficiência energética do processo, a ocorrência de defeitos e o tempo de processamento possuem correlação direta com a etapa de resfriamento na estampagem a quente [3]. Os canais ou dutos para passagem de fluido refrigerante (canais de resfriamento) das matrizes possuem um papel fundamental na transferência de calor. Esses canais são convencionalmente fabricados pelo processo de usinagem, na configuração de canais retos (CR), o que normalmente implica em restrições para acompanhar a geometria das matrizes, principalmente em casos de peças com formatos complexos. Tal limitação dificulta uma transferência de calor uniforme, resultando em ciclos de processo mais longos, resfriamento desigual e possíveis problemas de qualidade nas peças [3,4]. Como uma solução, podem ser aplicados canais de resfriamento projetados com geometrias curvas, apresentando distâncias constantes da superfície da cavidade seguindo a forma ou contorno da geometria da matriz, chamados de canais conformais.

No projeto de canais de resfriamento eficientes, devem ser consideradas restrições associadas a parâmetros como o diâmetro dos canais, distância entre canais, distância dos canais à superfície da matriz, bem como o número de canais e a sua disposição [3,5]. Nas análises de transferência de calor em uma matriz de estampagem a quente, fatores geométricos dos canais e sua quantidade podem influenciar a eficiência térmica do processo, visto que a troca de calor entre o fluido refrigerante e a superfície dos canais das matrizes depende diretamente da área de contato na superfície dos canais [6]. Considerando que a área de contato (A_c) de um canal corresponde a área superficial ao longo do comprimento deste, a área de resfriamento efetiva dos canais (A_{ec}) é igual a toda a área superficial dos canais de resfriamento presentes na matriz [7]. Com base nesta relação, teoricamente, o aumento da transferência de calor entre a superfície da matriz e a superfície do sistema de canais pode ser alcançado com o aumento do número de canais de resfriamento [6].

Estudos aplicando tecnologias de manufatura aditiva (MA) para fabricação de ferramentas de estampagem a quente com canais conformais têm evidenciado que estas tecnologias atendem aos requisitos do processo de estampagem a quente, ao terem seu desempenho comparável ao de ferramentas convencionais [8,9]. Muller et al. [10] e Gebauer et al. [11] utilizaram simulações e testes físicos em matrizes fabricadas por usinagem e manufatura aditiva para comparar ferramentas convencionais e com canais de resfriamento conformais. Eles identificaram que a aplicação de canais conformais melhorou significativamente o desempenho térmico do processo e pode reduzir o tempo de processamento do material [10,11]. No entanto, esses estudos não consideraram a substituição dos canais retos por um número equivalente de canais conformais. Uma análise qualitativa indica que a área efetiva (A_{ec}) nas novas configurações com canais conformais tende a ser muito superior, quando comparada com a configuração inicial (canais retos). Esse aspecto levanta o questionamento se estas melhorias estão associadas, de fato, ao novo *layout* ou, principalmente, ao aumento da A_{ec} .

No que se refere à fabricação por MA, Cortina et al. [12] e Arrizubieta et al. [13] compararam canais retos de mesma área efetiva de contato com materiais convencionais e materiais processados por MA. Nesse estudo, os autores identificaram que, embora os materiais depositados via MA tenham um desempenho térmico levemente inferior, as repostas em simulações de estampagem a quente são muito similares, sugerindo um desempenho de processo equivalente para os dois casos [12, 13]. Tran et al. [4] avaliaram ferramentas de testes com canais utilizando preenchimento com estruturas treliçadas fabricadas por MA e identificaram que o aumento da área efetiva de contato entre o canal e o fluido de resfriamento proporcionou uma melhoria significativa associada ao desempenho térmico do processo, o que foi validado por simulações físicas [4].

A aplicação de canais conformais em ferramentas de estampagem a quente ainda demanda maiores aprofundamentos quanto ao desenvolvimento do projeto dos canais, de forma a consolidar o entendimento sobre o efeito das áreas de contato e das configurações dos canais na matriz. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo investigar, por meio de simulações numéricas, o desempenho de canais de resfriamento conformais comparados a canais retos em um conceito de ferramenta demonstrativa multicanais. Além disso, uma comparação do desempenho do aço ferramenta H13 convencional frente ao maraging 300 fabricado pelo processo de manufatura aditiva por fusão em leito de pó a laser (FLP-L) foi realizada via simulação numérica.

2. MATERIAIS E METODOLOGIA

2.1. Materiais

Para as simulações de estampagem a quente, foram considerados como materiais das matrizes o aço ferramenta H13 convencional e o aço maraging 300 processado por FLP-L. Os dados para o aço H13 foram obtidos do banco de dados do *Simufact Material*, configurado como o material X40CrMoVS-1 (DIN 1.2344, JIS SKD61, AISI H13 ou GB 4Cr5MoSiV1), adequado para ferramentas de trabalho a frio ou a quente. Os dados utilizados para o aço maraging 300 foram também obtidos da mesma biblioteca, considerando o material para manufatura aditiva classificado como MS1_powder, representando um aço maraging 300 (1.2709) adequado para uso em processos de FLP-L. A Tabela 1 apresenta as propriedades térmicas e mecânicas dos materiais supracitados.

Foi definido o aço *Press Hardening Steel* (PHS) 1500 como material da chapa, com revestimento em AISi, cujas propriedades foram obtidas também do banco de dados do *Simufact Material*. Os dados para o material, classificado como DB.22MnB5_u (DIN 1.5528), incluem faixa de temperatura de trabalho de 25 a 1450 °C, deformação plástica efetiva de até 4% e taxa de deformação de até 1000/s.

Tabela 1. Propriedades dos aços ferramenta utilizados na simulação numérica.

Propriedade	Aço X40CrMoVS-1 (AISI H13)	Aço Maraging 300 - 1.2709 (MS1)
Condutividade térmica (T ambiente)	24,6 W/m·K	25,2 W/m·K
Capacidade específica de calor	0,46 J/g.K	0,45 J/g.K
Densidade	7800 kg/m ³	8000 kg/m ³
Fator de dissipação	0,9	0,9
Modulo elástico	210 GPa	190 GPa
Coefficiente de Poisson	0,3	0,3
Coefficiente de expansão térmica	1,01-0,5 1/K	1,01-0,5 1/K

2.2. Desenvolvimento do conceito das matrizes

Nesse trabalho, desenvolveu-se o conceito de uma matriz demonstrativa multicanais, com geometria simples, para simulação numérica do processo de estampagem a quente. O conceito simples visou permitir o entendimento dos fenômenos térmicos atuantes no processo e apresentou quatro configurações distintas (I a IV), cujas variações foram no material da matriz (H13 convencional ou maraging 300 processado por FLP-L), na configuração dos canais (retos - CR ou conformais - CC) e na quantidade de canais conformais (7 ou 13 canais), conforme indicado na Tabela 2.

Os parâmetros de projeto considerados foram o diâmetro do canal de resfriamento, a distância entre o centro do canal e a superfície da matriz e a quantidade de canais, visto que estes fatores influenciam diretamente a performance térmica da ferramenta [14]. Todas as quatro configurações de matrizes demonstrativas apresentaram os mesmos parâmetros: dimensões gerais (comprimento, largura e altura), diâmetro de canais e distância dos canais à superfície da matriz. As áreas efetivas de contato foram consideradas através da soma das áreas das superfícies internas de todos os canais.

Tabela 2. Configurações consideradas para o projeto das matrizes.

Configuração	Modelo de canal	Layout dos canais	Método de fabricação	Material da matriz
I	Canais retos	Longitudinal	Usinagem	Aço ferramenta H13
II	Canais retos	Longitudinal	Manufatura aditiva	Aço maraging 300 (1.2709)
III	7 Canais conformais	Transversal	Manufatura aditiva	Aço maraging 300 (1.2709)
IV	13 Canais conformais	Transversal	Manufatura aditiva	Aço maraging 300 (1.2709)

O diâmetro dos canais foi determinado levando-se em consideração a espessura do *blank* e as restrições de fabricação por FLP-L. Considerando a espessura da chapa de 1,5 mm, selecionou-se um diâmetro de canal de 8 mm, conforme recomendações para uma chapa com espessura inferior a 2 mm [5, 14]. Em processos de fusão em leito de pó a laser, diâmetros inferiores a 5 mm podem causar dificuldades para remoção do material residual do processo nas cavidades dos canais e diâmetros maiores que 8 mm podem apresentar defeitos de forma e acúmulo de material nas regiões superiores dos canais, devido à falta de sustentação de material durante a impressão [4, 14]. A distância entre canais foi determinada como 25 mm para as configurações I, II e III e reduzida para 14,3 mm na configuração IV, devido a limitação de espaço no comprimento da matriz.

Para a determinação da distância entre o centro dos canais e a superfície da matriz (“ Z_{min} ”), aplicou-se o método de Munvunzi [8], por meio da Equação 1, onde “ d ” corresponde ao diâmetro do canal, “ σ_m ” corresponde a tensão de escoamento do material da matriz e “ σ_y ” corresponde a tensão máxima admissível para a ferramenta. O método recomenda considerar a relação “ σ_m / σ_y ” como um valor de 1,5, sendo um fator de segurança [8].

$$Z_{min} = \sqrt{\frac{0,5\sigma_m d^2}{\sigma_y}} + d/2 \quad (1)$$

No processo de determinação da quantidade de canais de resfriamento (“ n ”), para as configurações de modelos reto e conformal, aplicou-se o método de Lim et al. [5], que considera que a área total dos canais deve ser igual ou superior a área de contato da peça, para garantir a transferência de calor requerida. Desta forma, o valor de “ n ” para um certo diâmetro (“ d ”) e comprimento de canais (“ L ”) deve atender à relação da Equação 2 onde “ A_p ” representa a área de contato da peça estampada. A Tabela 3 apresenta os parâmetros de projeto determinados para as configurações com CR e CC.

$$n \geq \frac{A_p}{\pi d L} \quad (2)$$

Tabela 3. Parâmetros de projeto das ferramentas com canais retos (CR) e canais conformais (CC).

Parâmetro	I e II 5 CR	III 7 CC	IV 13 CC
Diâmetro do canal (d) [mm]	8	8	8
Distância do centro do canal à superfície (Z) [mm]	11	11	11
Distância entre centros dos canais (Y) [mm]	25	25	14,3
Quantidade de canais (n)	5	7	13
Comprimento dos canais (l) [mm]	200	144,36	144,36
Área de contato por canal [mm ²]	5026,55	3628,16	3628,16
Área efetiva de contato (todos os canais) [mm ²]	25132,74	25397,14	47166,08
Material da matriz	H13 / Maraging 300	Maraging 300	Maraging 300

Visando analisar a relação entre o efeito das configurações dos canais (retos e conformais) e da área efetiva de contato (A_{ec}), a metodologia aplicada buscou implementar valores de (A_{ec}) similares nas configurações com 5 canais retos e com 7 canais conformais. Por limitações geométricas, houve uma diferença mínima (< 1%) entre os valores de (A_{ec}) nessas duas configurações mencionadas. A Figura 2 apresenta as configurações das matrizes conforme os parâmetros selecionados.

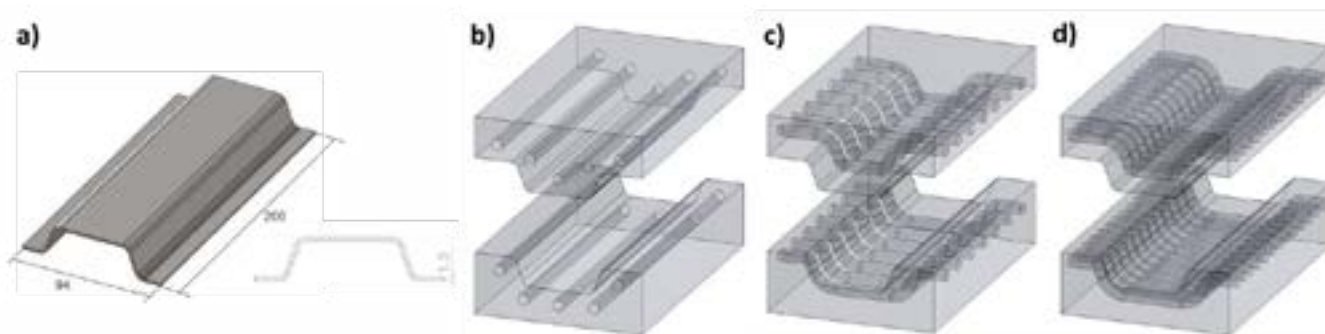


Figura 2. Resultados das configurações para a) peça após estampagem; b) matriz com 5 canais retos (I e II), c) matriz com 7 canais conformais (III) e d) matriz com 13 canais conformais (IV).

2.3. Simulação numérica do processo de estampagem a quente

Foi utilizado o *software* Simufact Forming para a realização das simulações numéricas do processo de estampagem a quente pelo método de elementos finitos. O *software* foi configurado para simulação 3D com elementos sólidos e casca, no módulo de “*sheet metal forming*”, tipo de processo como estampagem com transferência térmica nas matrizes superior e inferior. A simulação considerou as etapas de conformação e de resfriamento, com temperatura ambiente de 25°C e temperatura inicial de chapa de 870°C. Foi considerado o modelo de atrito de Coulomb com valor do coeficiente igual a 0,45 para o aço PHS 1500 [15], e a prensa foi configurada com velocidade de estampagem de 25 mm/s e força de 200 kN. O coeficiente de transferência térmica (HTC) entre a matriz e a chapa foi definido como variável de acordo com a pressão de contato, abrangendo uma faixa de 500 a 3200 W/m²K para pressões de 1 a 40 MPa [15].

A chapa (*blank*) foi configurada com espessura de 1,5 mm, aplicando-se uma malha de modelo “Sheetmesh”, com tamanho de elementos de 1,0 mm com cinco pontos de integração na espessura (“shell layers”). Foi definida uma composição de fases inicial 100% austenítica na chapa. Para as matrizes, foi considerada uma malha de configuração “Hexmesh”, com elementos do tipo hexaédrico com tamanho de elementos de 3,0 mm, considerando um refinamento de até 2,0 mm em regiões com geometrias menores, aplicado para ambas as partes superior e inferior das matrizes em cada simulação. Os canais (retos e conformais) foram modelados como um único elemento sólido e considerados como dutos rígidos preenchendo as cavidades dos canais nas matrizes, atuando como elementos extratores de calor a uma taxa de transferência de calor de 5000 W/m²K.

Nas simulações, foi aplicada uma análise em simetria, onde o *software* realiza a análise ajustada para metade dos modelos, de forma a economizar tempo de computação nas simulações sem comprometimento nos resultados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 4 apresenta os resultados das simulações numéricas com relação à capacidade de resfriamento e aos tempos envolvidos no processo.

Tabela 4. Resultados das simulações numéricas considerando as quatro configurações (I a IV).

Resultados	Configuração			
	I 5 CR H13	II 5 CR Maraging300	III 7 CC Maraging300	IV 13 CC Maraging300
Tempo para blank atingir martensita > 99%	6,4 s	6,9 s	7,4 s	7,4 s
Temperatura Máxima nas matrizes (em 7,4 s)	168 °C	162 °C	146 °C	155 °C

Comparando-se os desempenhos das matrizes com CR nos diferentes materiais, H13 e maraging 300 (MS1), (configurações I e II, respectivamente) identificou-se que a matriz em aço maraging 300 permitiu a completa formação martensítica do *blank* em cerca de 6,9 s, muito próximo ao tempo de 6,4

s para a matriz em H13. Esse tempo está associado, majoritariamente, à extração de calor da chapa pela matriz e é influenciado pela condutividade térmica do material e por outros aspectos, como a espessura da chapa, contrações térmicas na chapa e pelas condições de contato entre a matriz e chapa. Apesar desse aumento no tempo, a configuração II (Figura 3b) apresentou uma melhor distribuição térmica na superfície da matriz, quando comparada à configuração I (Figura 3a). Uma distribuição de calor mais uniforme pode reduzir efeitos associados ao desgaste e a fadiga térmica da matriz e contribuir com o aumento da sua vida útil. A Figura 3e apresenta os valores de temperatura na superfície das matrizes ao longo do eixo A-B e evidencia que a utilização do aço maraging 300 contribuiu para a redução da temperatura média na matriz nesse eixo.

Subsequentemente, ao analisar-se o desempenho das matrizes de aço maraging 300 nas configurações CR e CC (configurações II e III, respectivamente), observou-se um aumento no tempo para completa formação martensítica (> 99%) na configuração com CC. Os resultados preliminares indicam que, para uma geometria simples, considerando-se a configuração de CR e CC com valores muito similares de A_{ec} , os CC não demonstraram uma melhoria associada puramente à sua geometria. Apesar dos diferentes tempos alcançados, da perspectiva industrial, essa divergência pode ser pouco representativa, pois ambos os tempos giram em torno de 7 segundos. Por outro lado, houve uma redução da temperatura máxima nas matrizes de 162°C para 146°C e uma temperatura média mais baixa na configuração III (Figura 3e).

Ao comparar-se as configurações com canais conformais, pode-se observar que o uso de sete CC (configuração III) e o aumento do número de canais conformais para treze (configuração IV) não gerou nenhuma alteração no tempo necessário para formação de um teor de martensita superior a 99%. Analisando-se a Figura 3e para essas duas condições identifica-se que a configuração com sete CC possibilitou uma redução maior na temperatura ao longo do eixo avaliado, no entanto apresentou maior variação. Com o aumento no número de canais para treze, foi possível reduzir esta variação, contudo as temperaturas se elevaram, mas ainda permanecendo abaixo das medidas, quando comparadas com a configuração com aço H13.

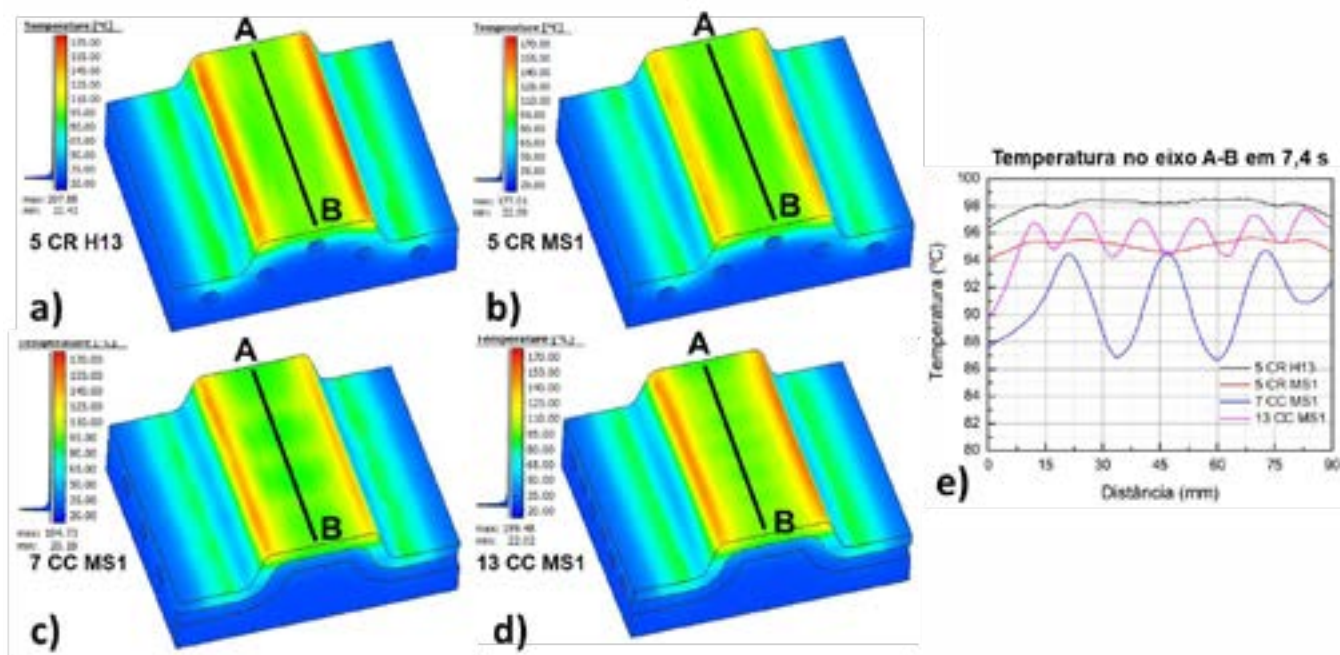


Figura 3. Distribuição de calor ao longo da matriz superior nas configurações a) I, b) II, c) III e d) IV, com as medições de temperatura no eixo A-B no tempo de 7,4 s de resfriamento em e).

A Figura 4 evidencia as temperaturas simuladas na superfície da chapa conformada a 7,4 segundos (tempo de finalização da formação martensítica para todas as configurações), em duas direções de análise, representadas como os eixos transversal A-B e longitudinal C-D ao longo do perfil da peça como demonstrado na Figura 4a. A Figura 4b indica que a troca do material de aço H13 (configuração I) para aço maraging (configuração II) reduziu a temperatura média na chapa. Em uma segunda análise pela Figura 4b, pode-se notar que, no eixo de medição A-B, a matriz com 7 CC

(configuração III) permitiu uma redução ainda mais evidente na temperatura, contudo, com uma maior variação.

As variações notadas nas configurações III e IV são associadas à quantidade de CC, com os vales representando as regiões de passagem dos canais e os picos, as regiões entre canais. A configuração IV, com maior área de contato nos CC, porém, não resultou em maior redução da temperatura na chapa, mas distribuiu melhor a temperatura, reduzindo as variações. As medições a 7,4 segundos no eixo C-D, mostradas na Figura 4c, indicam um perfil de temperatura muito similar para as 4 configurações. No entanto, nota-se um pico de temperatura para as configurações com aço maraging 300 (configurações II, III e IV), nas regiões referentes as laterais das peças conformadas. As temperaturas elevadas nesta região (na faixa de 400 a 500 °C) foram associadas à falta de contato entre as superfícies das matrizes e do *blank* devido às deformações durante a conformação, o que afetou a transferência de calor nesta região em específico. Este mau contato poderia ser evitado com ajuste na carga de pressão da prensa ou nas geometrias da ferramenta, demandando verificações futuras. A Figura 4c indica ainda que, na região central das peças, as configurações com canais conformais (III e IV) permitiram uma redução das temperaturas, apresentando um vale de maior largura em comparação ao vale nas medições das configurações com CR (I e II).

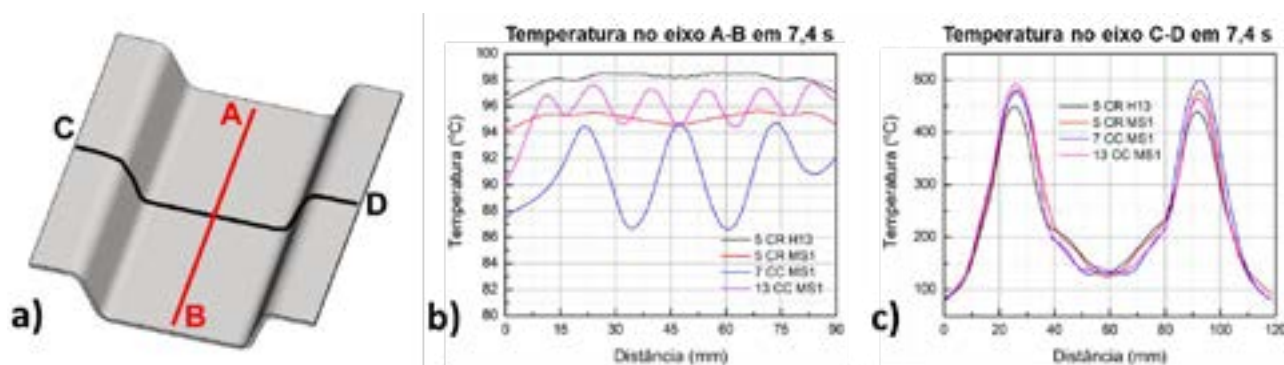


Figura 4. Temperatura ao longo da a) peça conformada nos eixos b) A-B e c) C-D.

Com base nos resultados obtidos em simulação, pode-se considerar que uma ferramenta fabricada em aço maraging 300 possui o desempenho necessário para substituir uma ferramenta de aço H13 sem perdas significativas no processamento, podendo, inclusive, promover melhorias em certos aspectos do processo e na distribuição térmica da ferramenta com a aplicação de um conceito de canais conformais. Vale ressaltar que as simulações não consideram análises de fluidodinâmica computacional (CFD) do escoamento do fluido para otimização da simulação. Em canais impressos por FLP-L, são esperados valores de rugosidade superficial nas faces internas dos canais superiores em comparação a canais usinados, o que poderia afetar o escoamento em um processo real. Mesmo que em baixo percentual, a possibilidade de possíveis porosidades associadas ao processo FLP-L podem afetar a condutividade térmica [16,17]. Assim, investigações em análises futuras são necessárias para verificar se estas variações seriam significativas para o desempenho do processo.

4. CONCLUSÕES

As simulações numéricas executadas no presente trabalho permitiram, através de uma análise preliminar, avaliar os materiais de ferramenta aço H13 e aço maraging 300 como materiais de matrizes de estampagem a quente, trazendo também uma análise comparativa de desempenho de matrizes com diferentes configurações de canais de resfriamento retos ou conformais. As principais conclusões estão explicitadas a seguir:

- O aço maraging 300 (MS1) possui desempenho similar ao do aço ferramenta H13, como materiais de ferramentas de estampagem a quente;
- O uso de CC permite obter melhoria na distribuição de calor na peça estampada e na matriz;
- Nas comparações com configurações de matrizes de CR e CC com as mesmas áreas efetivas de contato, não se obteve uma melhoria significativa de desempenho puramente pelo uso de CC, o que pode indicar que as melhorias relatadas em outros estudos do uso de CC podem

estar associadas ao aumento de número de canais e da área efetiva superficial dos canais e/ou à complexidade da geometria da peça estampada;

- Para aprofundar o entendimento das comparações entre conceitos de CR e CC e da fabricação de matrizes de estampagem a quente por manufatura aditiva, é necessário, ainda, realizar simulações com outras condições e considerando análises de CFD, bem como, testes físicos reais com matrizes usinadas e manufaturadas aditivamente, de forma a se obter mais resultados que comprovem ou complementem as análises realizadas neste trabalho.

Referências

- [1] KARBASIAN, Hossein; TEKKAYA, A. Erman. A review on hot stamping. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 210, n. 15, p. 2103-2118, 2010.
- [2] BILLUR, E. Ed., *Hot Stamping of Ultra High-Strength Steels: From a Technological and Business Perspective*. Springer, 2019.
- [3] FENG, S. KAMAT, A.M. PEI. Y. Design and fabrication of conformal cooling channels in molds Review and progress updates. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 171. 2021.
- [4] TRAN, V.L., KIM, B.C., DO, T.T., ZHANG, S., CHANG, K., HONG, S.T., AUYESKHAN, U. CHOI, J., KIM, D.H. Cooling Performance of an Additively Manufactured Lattice Structural Conformal Cooling Channel for Hot Stamping. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. V. 23. P. 1443-1452. 2022.
- [5] LIM, W.S., CHOI, H.S., AHN, S.Y., KIM, B.M. Cooling channel design of hot stamping tools for uniform high-strength components in hot stamping process. *Int J Adv Manuf Technol*. V. 70. P. 1189-1203. 2014.
- [6] MUVUNZI, R., DIMITROV, D.M., MATOPE, S., HARMS, T.M. Heat Transfer in a Hot Stamping Process: A Review. *R & D Journal of the South African Institution of Mechanical Engineering*. V. 33, P. 75-84. 2017.
- [7] CHANTZIS, D., LIU, X., POLITIS, D.J., SHI, Z., WANG, L. Design for additive manufacturing (DfAM) of hot stamping dies with improved cooling performance under cyclic loading conditions. *Additive manufacturing*. V. 37. 2021.
- [8] MUNVUNZI, R. Application of Additive Manufacturing for Improved Thermal Management of Hot Sheet Metal Forming Tools. Dissertation presented for the degree of Doctor of Philosophy in Industrial Engineering in the Faculty of Engineering at Stellenbosch University. Stellenbosch University. 2020.
- [9] PUJANTE, J., GONZÁLEZ, B., & GARCIA-LLAMAS, E. Pilot demonstration of hot sheet metal forming using 3D printed dies. *Materials*, V.14, 5695. 2021.v. 228. P. 25-33.
- [10] MUELLER, B., HUND, R., MALEK, R., GEBAUER, M., POLSTER, S., KOTZIAN, M., NEUGEBAUER, R. Added Value in Tooling for Sheet Metal Forming through Additive Manufacturing. *Proceedings of International Conference on Competitive Manufacturing (COMA 13)*. 2013.
- [11] GEBAUER, M., STOLL, P., MULLER, B., SPIERINGS, A., POLSTER, S., FELD, T., KLINGER, M., ZURBRUGG, A. High performance sheet metal forming tooling by additive manufacturing. *Proceedings of the 6th International Conference on Additive Technologies (ICAT 2016)*. 2016.
- [12] CORTINA, M. ARRIZUBIETA, J.I. CALLEJA, A. UKAR, E. ALBERDI, A. Case study to illustrate the potential of conformal cooling channels for hot stamping dies manufactured using hybrid process of laser metal deposition (LMD) and milling. *Metals*, 8, 102. 2018.
- [13] ARRIZUBIETA, J.I., CORTINA, M., MENDIOROZ, A., SALAZAR, A., LAMIKIZ, A. Thermal Diffusivity Measurement of Laser-Deposited AISI H13 Tool Steel and Impact on Cooling Performance of Hot Stamping Tools. *Metals*. V. 10, N. 154. 2020.
- [14] CHANTZIS, D., LIU, X., POLITIS, D.J., FAKIR, O.E., CHUA, T.Y., SHI, Z., WANG, L. Review on additive manufacturing of tooling for hot stamping. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. V. 109. P. 87-107. 2020.
- [15] PORZNER, H., BILLUR, E. Computer Modeling of Hot Stamping, em: BILLUR, E. Ed. *Hot Stamping of Ultra High-Strength Steels: From a Technological and Business Perspective*. Springe. P. 203-223. 2019.
- [16] KUMAR, A.Y., WANG, J., BAI, Y., HUXTABLE, S.T.; WILLIAMS, C.B. Impacts of process-induced porosity on material properties of copper made by binder jetting additive manufacturing. *Materials and Design*. V. 182. 2019.
- [17] TOMANEK, L.B., STUTTS, D.S., PAN, T., LIOU, F. Influence of porosity on the thermal, electrical, and mechanical performance of selective laser melted stainless steel. *Additive Manufacturing*. V. 39. 2021.



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil
26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

Determinação de Curva Limite de Conformação à quente

L.F. Folle ⁽¹⁾
M.P.S. Santos ⁽¹⁾
T.N. Lima ⁽¹⁾
B. Callegari ⁽¹⁾
B.C.S. Silva ⁽¹⁾

RESUMO

A estampagem a quente de aços temperáveis vem sendo estudada há mais de 30 anos, principalmente no setor automotivo. No entanto, alguns desafios associados ao processo ainda precisam ser investigados, tais como novos recobrimentos que geram condições de atrito, até então, desconhecidas, levantamento das propriedades térmicas e mecânicas a altas temperaturas e as altas taxas de deformação devido ao processo ser feito muito rapidamente. Um desses desafios consiste no levantamento da Curva Limite de Conformação (CLC) a quente, visto que a aplicação do método Nakajima, que é normatizado, é quase impossível em virtude do ferramental ter que ser todo aquecido. Um método de levantamento da CLC que vem sendo muito utilizado se baseia na teoria de Mohr Coulomb Modificada (MMC - *Modified Mohr Coulomb*), e permite a obtenção de dados através de ensaios de tração que viram pontos na curva CLC. Assim, esse trabalho tem por objetivo aplicar o MMC para levantar a CLC e avaliar a eficácia desse método. Os resultados indicam que, ao menos, para as deformações no estado plano, a CLC obtida conseguiu prever as falhas.

Palavras-chave: Estampagem a quente, Curva Limite de Conformação, elementos finitos, Aço 22MnB5.

ABSTRACT

Hot sheet metal forming of hardenable steels has been studied for over 30 years, mainly in the automotive sector. However, some challenges associated with the process still need to be investigated, such as new coatings that generate previously unknown friction conditions, determination of thermal and mechanical properties at high temperatures and high strain rates due to the process being carried out very quickly. One of these challenges is determining the Hot Forming Limit Curve (FLC), since the application of the Nakajima method, which is standardized, is almost impossible due to the entire tooling having to be heated. A method for determining FLC that has been widely used is based on the Modified Mohr Coulomb theory (MMC) and allows data to be obtained through tensile tests in which points on the FLC curve are obtained. Therefore, this work aims to apply the MMC to determine the FLC and evaluate the effectiveness of this method. The results indicate that, at least for plane strains, the CLC was able to predict failures.

Keywords: Hot stamping, Forming Limit Curve, finite elements, 22MnB5 steel.

⁽¹⁾ SENAI CIMATEC - Instituto SENAI de Inovação (ISI) em Conformação e União de Materiais (SENAI CIMATEC ISI C&UM), Salvador, Brasil.

1. INTRODUÇÃO

A estampagem a quente de aços para tratamento térmico tem se desenvolvido bastante nos últimos anos, em função das demandas da indústria automotiva. Cada vez mais, o desempenho em colisões deve ser melhorado, exigindo, assim, uma maior resistência dos aços utilizados. Por isso, esses materiais devem apresentar, em geral, uma microestrutura majoritariamente martensítica. A **Figura 1** apresenta as duas variantes de estampagem no qual a peça deve passar por um tratamento térmico de têmpera. No processo indireto, a peça é primeiramente estampada e subsequentemente aquecida e temperada, com formato próximo do final. Já no processo direto, o *blank* é aquecido em forno, estampado e tratado termicamente simultaneamente [1].

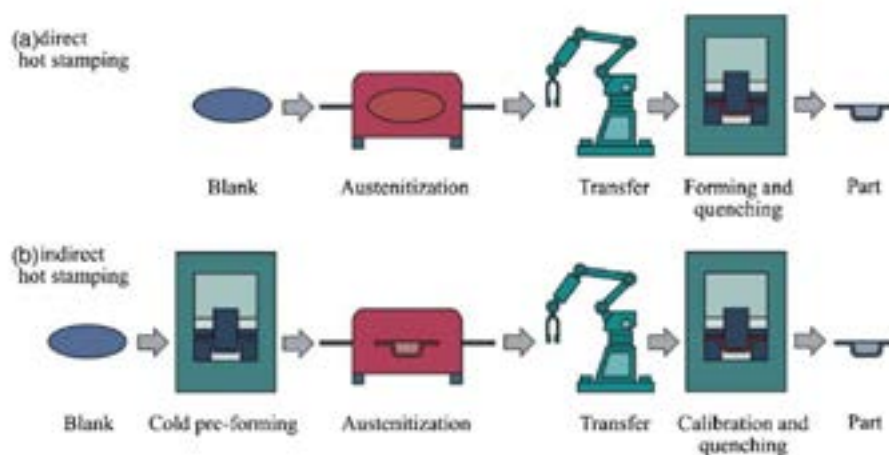


Figura 1. Configurações básicas do processo de estampagem a quente: (a) estampagem a quente direta, (b) estampagem a quente indireta. [1]

Um dos principais desafios relacionados ao processo de conformação e têmpera simultâneos (CTS) é a capacidade de deformação sem que ocorram rupturas, previstas pela Curva Limite de Conformação para altas temperaturas. O levantamento da CLC a frio é bem consolidado, sendo realizado pelo ensaio de Nakajima, e cujo equipamento pode ser facilmente manuseado sem grandes perigos. Já para o levantamento a quente da CLC, o ensaio exige cuidados com a alta temperatura, além de todo um aparato interno ao forno para aquecimento e manutenção da temperatura. No entanto, esse sistema se limita, atualmente, a uma temperatura de 400°C (**Figura 2**), o que limita sua aplicabilidade ao levantamento de curvas em condições de estampagem a quente, já que as temperaturas do processo são consideravelmente mais elevadas, da ordem de 600 a 800°C.



Figura 2. Sistema de ensaio Nakajima à quente (limitado a 400°C). [2]

Uma alternativa que vem sendo adotada para se alcançar os limites do material é através do método Mohr Coulomb Modificado (MMC - *Modified Mohr Coulomb*), no qual são levantados, através de ensaios, parâmetros do estado triaxial de tensões, ângulo de Lode e limite de deformação. A **Figura 3(a)** apresenta o resultado da superfície de fratura e a **Figura 3(b)** mostra a transposição do método

MMC para a CLC. Uma das vantagens desse método é que ele pode ser obtido apenas por variações de corpos de prova para ensaio de tração, o que simplifica bastante os testes. Entretanto, esse método ainda não foi aplicado ao levantamento da CLC à quente.

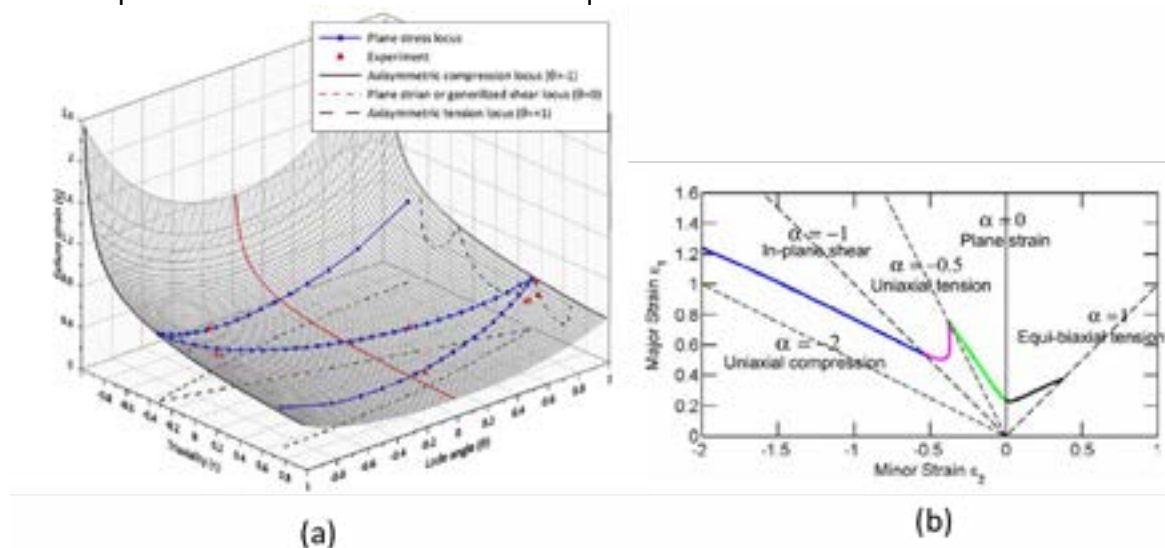


Figura 3. (a) Superfície de fratura pelo método MMC [3]. (b) Curva CLC obtida pelo método MMC [4].

2. MATERIAIS E METODOLOGIA

2.1. Materiais

O material usado para esse trabalho foi o aço 22MnB5, específico para estampagem a quente, com espessura de 1,8 mm e recobrimento de ZnFe. As propriedades do material foram obtidas da referência [2]. As ferramentas de conformação dos testes das peças foram feitas em aço H13.

2.2. Condições para a estampagem a quente da geometria teste

Para a execução do teste de estampagem, foram utilizados uma prensa hidráulica da Luxor de 650 ton, um forno mufla da Jung e um sistema de resfriamento da Refrisat. As condições de estampagem foram:

- Temperatura do *blank* no forno: 900°C;
- Tempo de encharque: 7 min;
- Tempo de transferência: 10s;
- Temperatura ambiente: 28°C;
- Velocidade de estampagem: 25 mm/s;
- Tempo de têmpera: 10 s.

2.3. Teste de levantamento do coeficiente de transferência de calor por convecção

Como a chapa é aquecida em um forno até a temperatura de austenitização (900°C), removida do forno e levada para estampagem, foi necessário levantar os coeficientes de transferência térmica por convecção, juntamente com a emissividade. Para isso, um termopar foi soldado a uma chapa de 200 x 100 mm (**Figura 4**), a qual foi colocada em um forno de aquecimento até 900°C e posteriormente submetida a resfriamento ao ar, obtendo-se, assim, a curva de resfriamento.



Figura 4. Chapa usada para a obtenção da curva de resfriamento.

Posteriormente, foi simulada, através do *software* Simufact Forming, a condição de resfriamento ao ar, obtendo-se, assim, o coeficiente de transferência térmica por convecção de $8 \text{ W/m}^2\text{K}$ e emissividades de 0,8 (25°C) e 0,2 (800°C). Essa variação de emissividade ocorre devido a mudança da condição superficial da chapa à medida que ela resfria (escurecimento da superfície). A **Figura 5** mostra as curvas obtidas pela medição da temperatura e pela simulação do Simufact.

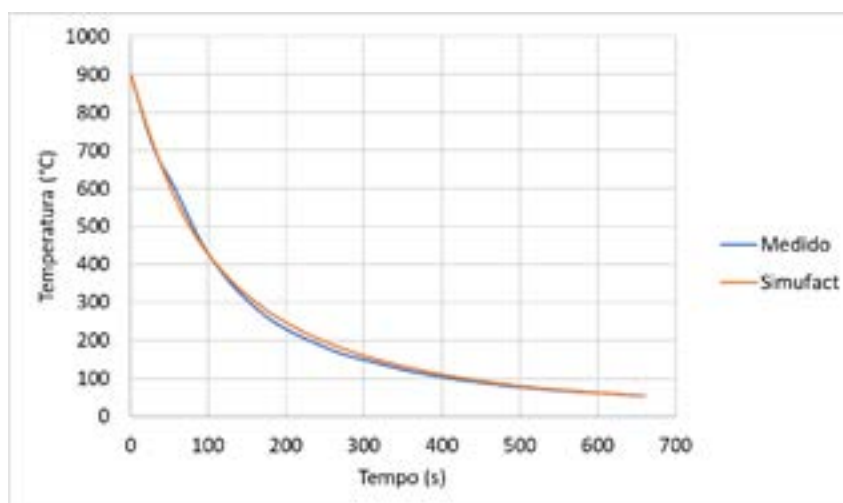


Figura 5. Curvas de resfriamento obtidas pela medição e pelo Simufact.

2.4. Ensaio de levantamento da deformação limite de ruptura em estado plano

Pelo método MMC, já comprovou-se que existem geometrias que geram estados tensão/deformação diferenciados. Para o estado plano de deformação, a literatura mostra que a geometria da **Figura 6** apresenta deformações da CLC menor (ϵ_2) da ordem de 0,03. Assim, se for obtida a deformação maior (ϵ_1) de ruptura, será possível determinar em que altura a CLC estará no eixo das ordenadas. Para essa geometria, o estado triaxial de tensões é em torno de 0,6. O estado triaxial de tensões é definido como a tensão média (média das três tensões principais) dividida pela tensão de von Mises. Dessa forma, se a geometria da **Figura 6** for submetida a uma temperatura e taxa de deformação específicas, é possível obter o ponto do estado plano de deformação a quente da chapa.

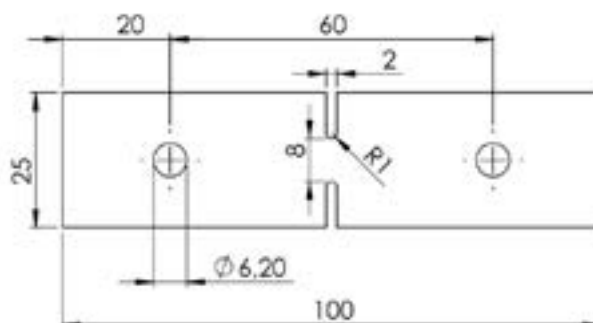


Figura 6. Geometria do corpo de prova usado para levantar o estado plano de deformação.

2.5. Simulação numérica utilizada para as validações

Para validar o método proposto nesse trabalho, foi confeccionada uma matriz de estampagem a quente considerando uma geometria representativa de componente automotivo e, posteriormente, foi realizada a simulação numérica desse processo. A Figura 7 mostra o ferramental fabricado e o modelamento computacional desse ferramental. O *software* usado para a simulação foi o Simufact Forming. O *blank* foi modelado como sendo *solid-shell* com malha de 2 mm e 5 pontos de integração na espessura. As matrizes foram modeladas com elementos tetraédricos com 3 mm e material deformável. Os canais foram modelados como rígidos sem condução de calor internamente. O coeficiente de atrito usado foi de 0,45 [5].

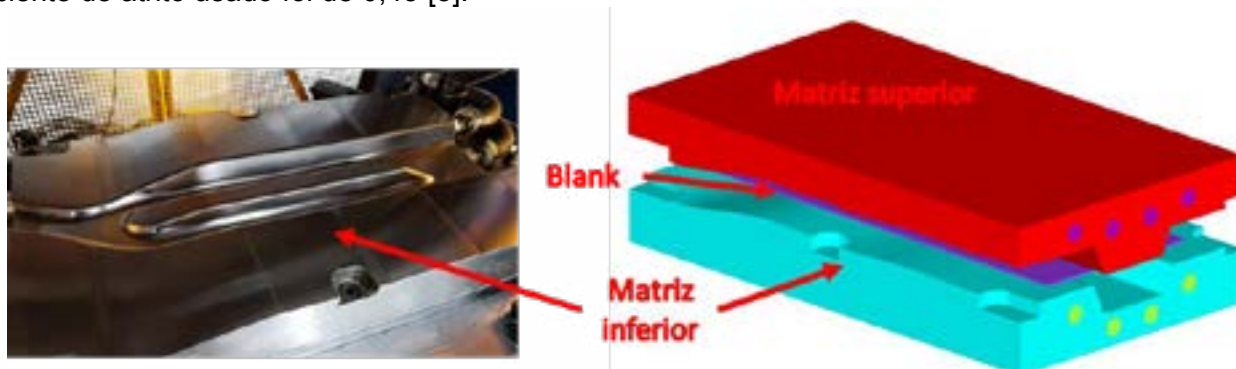


Figura 7. Geometria usada para a conformação das peças (esquerda) e modelo desenvolvido para a simulação numérica (direita).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Obtenção da CLC na temperatura de trabalho

Primeiramente, foi simulada a estampagem da geometria da Figura 7 sem a aplicação da CLC, para determinação da temperatura e da taxa de deformação, que foram em torno de 800°C e 2 s⁻¹, respectivamente. A velocidade imposta à máquina para alcançar essa taxa de deformação foi de 6 mm/s. Após, foi feito ensaio de deformação a quente da peça da **Figura 6** um simulador termomecânico Gleeble® 540, nessas condições, para obtenção do comprimento de ruptura (Figura 8). Esse teste foi, então, simulado no Simufact, onde obteve-se uma deformação plástica efetiva de 0,49. Com a deformação efetiva e o estado de triaxialidade da chapa, pelas equações da referência [6], é possível obter as deformações maior e menor da CLC, que são 0,4 e 0,03, respectivamente. Os valores de r_0 e r_{90} foram usados como sendo 1, devido à alta temperatura.



Figura 8. Corpo de prova ensaiado à temperatura de 800°C e 2 s⁻¹.

No trabalho de Cui et al. (2010) [2], foi constatado que a CLC a quente apresenta formatos muito próximos para diferentes temperaturas, variando apenas o patamar de deformação plana, ou seja, subindo no eixo das ordenadas e se posicionando entre os limites de tensão uniaxial ($\epsilon_1 = -2 \epsilon_2$) e deformação biaxial ($\epsilon_1 = \epsilon_2$), de acordo com a Figura 9. É possível observar que a curva em vermelho, correspondente a uma temperatura de 800°C, apresenta um patamar próximo de 0,4 de deformação maior, o que foi próximo do obtido para o ensaio da Figura 8.

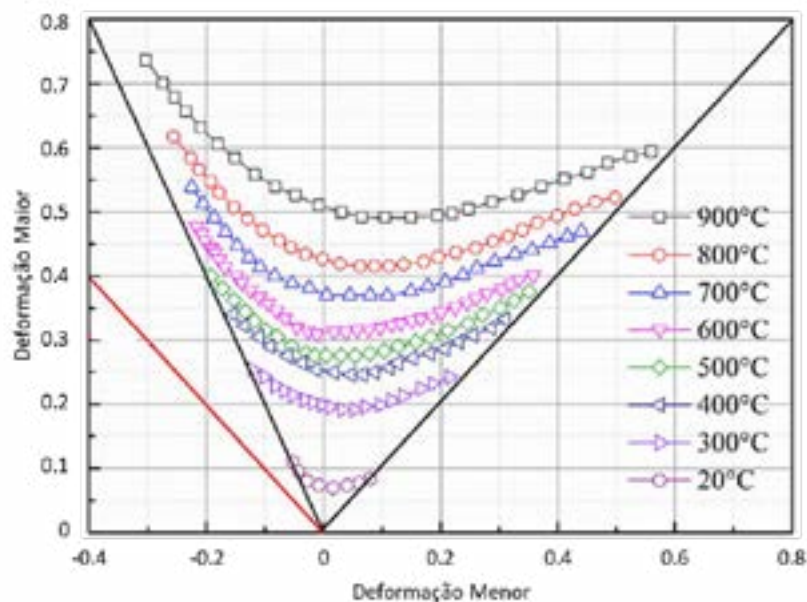


Figura 9. CLCs a quente obtidas para várias temperaturas pelo trabalho de [2].

3.2. Simulação da peça teste

A CLC foi plotada manualmente no Simufact Forming, com manutenção das regiões em amarelo, verde e roxo, no formato padrão. O resultado pode ser observado na Figura 10. É possível observar que as regiões em vermelho e amarelo, que correspondem a ruptura e risco de ruptura, respectivamente, ficam próximas das regiões de dobramento interno da peça. A CLC foi plotada na forma de duas retas inclinadas a partir da deformação plana de 0,4.

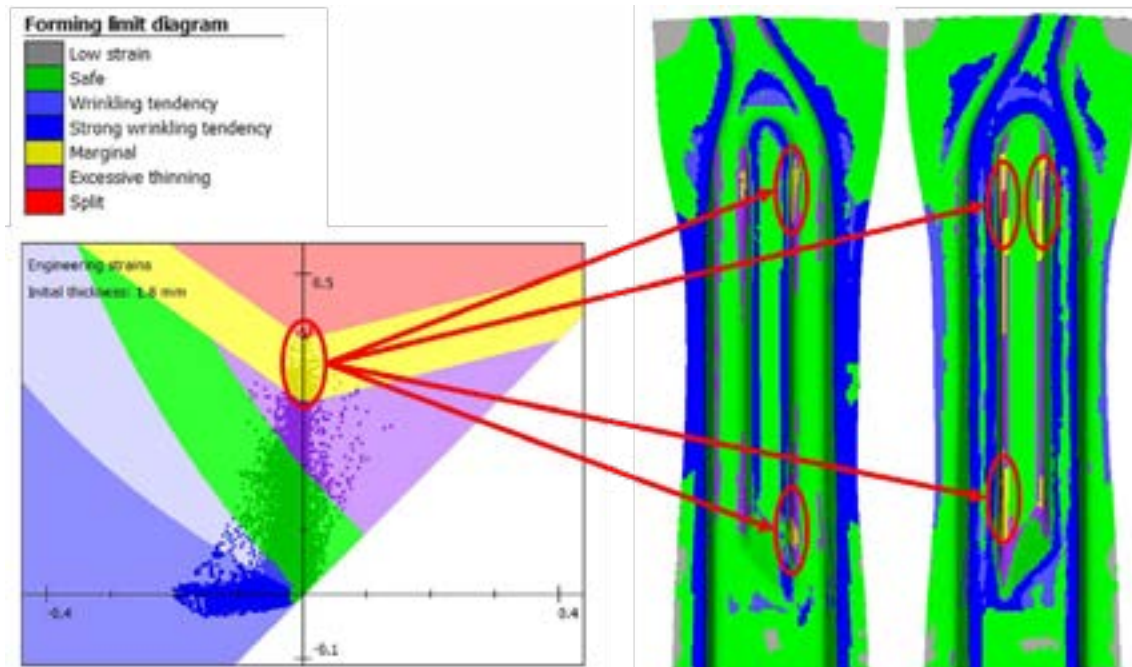


Figura 10. Peça simulada com as zonas de risco de falha em amarelo e falha em vermelho.

3.3. Peças fabricadas na matriz de estampagem a quente

A peça de trabalho foi estampada nas condições descritas no item 2.2, e o resultado pode ser visto na Figura 11. As regiões circuladas em vermelho foram as zonas que apresentaram ruptura, comprovando, assim, que a curva limite conseguiu prever a falha na peça para as condições de operação.

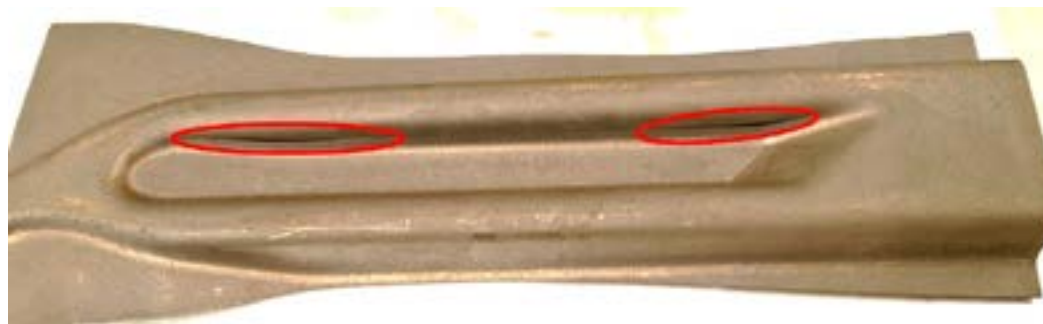


Figura 11. Peça estampada com as zonas circuladas em vermelho onde houve ruptura da chapa.

4. CONCLUSÕES

O levantamento da CLC a quente é uma tarefa difícil, por exigir todo um sistema de aquecimento e proteção específico. Além disso, as altas temperaturas envolvidas no processo são altamente críticas para os ferramentais, resultando em problemas associados ao desgaste e fadiga térmica, caso fosse aplicado o método Nakajima convencional. Com o desenvolvimento do método MMC, foi possível simplificar os testes e alcançar resultados muito próximos das condições reais. No entanto, isso ainda não havia sido feito para altas temperaturas, pois exige uma validação tanto por simulação, quanto por estampagem de uma peça real. Assim, esse artigo mostrou que é possível levantar essa curva, com a utilização de um simulador termomecânico (ensaios físicos) e de *softwares* de simulação para o processo. Mesmo assim, mais testes devem ser feitos para se verificar se, sob outros estados de deformação, a CLC obtida ainda é capaz de gerar resultados confiáveis.

Referências

- [1] H. Karbasian and A. E. Tekkaya, "A review on hot stamping," *J Mater Process Technol*, vol. 210, no. 15, pp. 2103–2118, 2010, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.07.019.
- [2] J. Cui, G. Sun, J. Xu, X. Huang, and G. Li, "A method to evaluate the formability of high-strength steel in hot stamping," *Mater Des*, vol. 77, pp. 95–109, 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.04.009.
- [3] M. Ganjiani, "A damage model for predicting ductile fracture with considering the dependency on stress triaxiality and Lode angle," *European Journal of Mechanics, A/Solids*, vol. 84, no. November 2019, p. 104048, 2020, doi: 10.1016/j.euromechsol.2020.104048.
- [4] A. M. Beese, M. Luo, Y. Li, Y. Bai, and T. Wierzbicki, "Partially coupled anisotropic fracture model for aluminum sheets," *Eng Fract Mech*, vol. 77, no. 7, pp. 1128–1152, 2010, doi: 10.1016/j.engfracmech.2010.02.024.
- [5] H. Porzner and E. Billur, "Computer Modeling of Hot Stamping," in *Hot Stamping of Ultra High-Strength Steels*, 2019. doi: 10.1007/978-3-319-98870-2_10.
- [6] M. J. Mirnia and M. Shamsari, "Numerical prediction of failure in single point incremental forming using a phenomenological ductile fracture criterion," *J Mater Process Technol*, vol. 244, pp. 17–43, 2017, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.01.029.

Smart Tools for Smart Press Shops

Apostolos Papaioanu¹, Christian Held², Otto Lampert³, João Henrique Corrêa de Souza⁴

¹ Geschäftsführer, apostolos.papaioanu@ilariz.com

² Geschäftsführer, christian.held@ilariz.com

³ Head of Sales & Marketing, otto.lampert@ilariz.com

⁴ Consultant, joaohenrique@technnova.com.br

Summary:

For some time now, the pressing plants have been faced with the challenge of delivering the highest quality and at the same time minimizing rejects and downtimes. The pressure to meet these requirements has recently increased due to the dramatic increase in material prices and the significant improvement in the CO2 balance. So far, all attempts to monitor and possibly control a forming tool during the first stroke have failed. All systems developed to date assess a manufactured part and use this to infer the next component to be manufactured. For the first time worldwide and exclusively, the Draw.Monitor system from iLARIZ GmbH allows monitoring of the forming process during the ongoing stroke. Using intelligently built-in standard sensors, customers of the iLARIZ Draw.Monitor can examine and evaluate the result of each stroke. The press shops can determine live what number of strokes are being used, how long the downtimes are, how many defective parts have been produced, and how large the deviation from the ideal process is. This means that components that are free of cracks but are too thin can be identified in good time and eliminated from the rest of the manufacturing process. The iLARIZ System Draw.Control goes a decisive step further. Like Draw.Monitor, Draw.Control is unique worldwide. For the first time, the tools can be manipulated during the forming stroke in such a way that reliable component production can be guaranteed. The actuators react within milliseconds to the data measured by the sensors and increase or decrease the pressure of the tool on the board. In this way, the force of the sheet metal feed, which is decisive for the manufacturability of sheet metal components, is kept constant. The system is suitable for both rigid and soft blank holder constructions and can also be retrofitted into existing tools. This is accompanied by a reduction in resource consumption and CO2 emissions, since there is less production scrap and semi-finished products produced have to be melted down again due to quality defects. In addition, the system offers the possibility of digitally monitoring the production process using the information-rich process data used for control, in order to create digital process transparency either in your own Draw.Cloud environment or in higher-level IT systems.

42º SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil

26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis

12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

Inteligência Artificial (IA): conceitos, soluções, desafios e oportunidades para indústria

Artificial Intelligence (AI): Concepts, Solutions, Challenges, and Opportunities for Industry

Roderval Marcelino ⁽¹⁾

Iury Melo Américo ⁽²⁾

Lírio Schaefer ⁽³⁾

Nicolas Cechinel Rosa ⁽⁴⁾

RESUMO

A Inteligência Artificial (IA) é o campo da ciência da computação que busca sair do processamento binário e imitar o raciocínio humano realizando tarefas complexas principalmente se valendo a alta capacidade de processar grandes quantidades de dados. Esses sistemas utilizam algoritmos e modelos matemáticos para aprender, reconhecer padrões, classificar dados, tomar decisões, simulando decisões humanas. Existem muitos termos, conceitos, jargões que para aqueles que não são da área pode parecer complexo demais e prejudicar possíveis aplicações reais. Há várias abordagens e técnicas de IA como, aprendizagem de máquina (Machine Learning), redes neurais, processamento de linguagem natural (NLP) e visão computacional, como exemplos. Com a capacidade de processar grandes quantidades de dados, cada vez mais rápido, as aplicações na indústria começam a aparecer, sendo inevitável seu uso agora ou no futuro próximo. Na área de manufatura, por exemplo, a IA é aplicada para otimizar processos, prever falhas, melhorar a qualidade e aumentar a produtividade. A Inteligência Artificial é um campo promissor que está revolucionando a indústria. Suas soluções trazem benefícios significativos, mas também enfrentam desafios relacionados à ética, segurança, tratamento de dados e privacidade. Aqueles que souberem aproveitar as oportunidades oferecidas pela IA estarão em uma posição vantajosa para impulsionar o progresso e a inovação em suas respectivas indústrias.

Palavras-Chaves — Inteligência Artificial, Aprendizado de Máquina, Indústria 4.0, Conformação Mecânica.

ABSTRACT

Artificial Intelligence (AI) is the field of computer science that aims to move beyond binary processing and mimic human reasoning by performing complex tasks, primarily leveraging its high capacity to process large amounts of data. These systems use algorithms and mathematical models to learn, recognize patterns, classify data, make decisions, simulating human decision-making. There are many terms, concepts, and jargon that may seem too complex for those outside the field, potentially hindering real-world applications. There are various approaches and AI techniques such as Machine Learning, neural networks, Natural Language Processing (NLP), and computer vision, as examples. With the ability to process vast amounts of data increasingly quickly, applications in the industry are beginning to emerge, making its use now or in the near future inevitable. In the manufacturing sector, for instance, AI

is employed to optimize processes, predict failures, enhance quality, and boost productivity. Artificial Intelligence is a promising field that is revolutionizing the industry. Its solutions bring significant benefits but also face challenges related to ethics, security, data handling, and privacy. Those who can harness the opportunities presented by AI will be in an advantageous position to drive progress and innovation in their respective industries.

Keywords — Artificial intelligence, Machine Learning, Industry 4.0, Mechanical Forming

1. INTRODUÇÃO

A Inteligência Artificial (IA) melhora significativamente a capacidade do setor industrial, já que ela trabalha em diversos níveis de negócio, desde planejamento de pessoal até o design de produtos, maximização de performance, controle de qualidade de produtos e bem estar de colaboradores [1]. Os algoritmos de IA ajudam os negócios a preverem mudanças no mercado e a maximizar a cadeia de produção.

A IA é um dos componentes centrais da **Indústria 4.0**, ou quarta revolução industrial. Chamamos de Indústria 4.0 a revolução que traz as chamadas fábricas inteligentes, maquinário inteligente e uso de dados e *big data* na tomada de decisão [2]. Ela também traz quatro tipos fundamentais de tecnologias disruptivas, que podemos listar e citar alguns exemplos: Conectividade, dados e poder computacional: cloud e internet; Análíticas e inteligência: inteligência artificial, análíticas avançada; Interação homem-máquina: realidade aumentada, realidade virtual, robótica; e Engenharia avançada: nanopartículas, impressoras 3D

Aplicada na Indústria 4.0, a IA integra um gama de tecnologias que permitem que o software e a máquina possam sentir, agir e aprender operações humanas. As fábricas inteligentes compostas por processos de produção hiperconectados compreendem múltiplas máquinas que estão interconectadas e gerando muitos dados. Os fabricantes estão passando por uma transformação digital que gerencia e utiliza esses dados aproveitando a Inteligência Artificial para melhor controle de qualidade, padronização e manutenção. [1]

Com uma indústria compatível com a IA, a manufatura vai trabalhar de uma forma sem precedentes. As fábricas conseguirão evitar paradas prevendo atrasos, realizar o controle de inventário utilizando rastreamento do estoque, antecipando o tempo de entrega e provendo produtos com a mais alta qualidade. Para monitorar o processo de produção e achar defeitos como rachaduras microscópicas, a Visão Computacional poderá ser utilizada. A IA conseguirá avisar as companhias sobre problemas na linha de produção que possam levar a problemas de qualidade e os mais sérios podem ser evitados de forma preemptiva [2].

2. O QUE É IA E COMO ELA FUNCIONA

O termo Inteligência Artificial (IA) foi cunhado pelo professor emérito John McCarthy da Universidade de Stanford, EUA, em 1955. Ele mesmo definia IA como a ciência e engenharia de construir máquinas inteligentes [3]. De uma forma simplificada, ela é um campo de estudo que combina a ciência da computação e *datasets* robustos que permitem a resolução de um problema. Ela engloba os subcampos do Machine Learning e Deep Learning (como vemos na figura 1) que são, frequentemente, mencionados em conjunto com a Inteligência Artificial [4].

Para o filósofo John Searle, podemos separar a IA em 2: **Inteligência Artificial Forte** (ou Geral, ou ainda Generalista) e **Inteligência Artificial Fraca** (ou Restrita). O trabalho original diz que a IA Fraca é a suposição que um software mais hardware, sozinhos, são capazes de simular todos os aspectos da mente humana, em outras palavras, imitá-la. Já a IA Forte é a suposição que a soma de software mais hardware de computador, sozinhos, são capazes de emular a mente humana, ou seja, executá-la [5]. Se os pesquisadores fossem capazes de desenvolver uma IA Forte, a máquina teria uma inteligência equiparada a do ser-humano, ela seria autoconsciente em ter a habilidade de resolver problemas, aprender e planejar para o futuro. Na IA Fraca, o computador foca em aprender uma única tarefa específica, como aprender a dirigir, responder questões ou realizar uma tradução, mas nunca todas de

uma vez. Ela depende da interferência humana para definir os parâmetros do seu algoritmo de treinamento e para prover dados de treinamento relevantes para conseguir atingir sua função objetivo, que é o que fazemos atualmente [6].

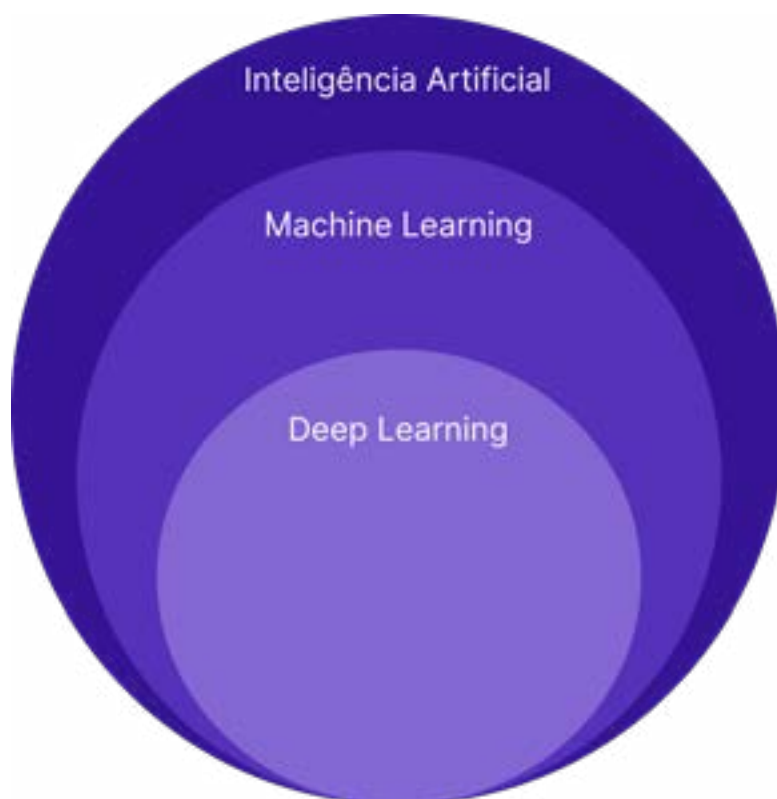


Figura 1: IA, Machine Learning e Deep Learning. Adaptado de [7].

O **treinamento de modelos** de IA, no geral, seguem os mesmo passos. A primeira coisa a ser feita após definir qual será o problema, entradas e a saída que buscamos, é adquirir dados de treinamento, podendo esses serem etiquetados (para o caso de aprendizado supervisionado) ou não. A qualidade e quantidade dos dados são essenciais para que o modelo consiga generalizar e performar bem em produção. Após a coleta dos dados, é necessário, em alguns casos, fazer a limpeza e pré-processamento, que pode então ser separado em dados de treino, validação e teste. É crucial que a rede seja testada em dados nunca vistos antes para evitar que a rede *overfit* nos dados de treino. Logo após, ela é alimentada com esses dados e então os hiperparâmetros da rede são ajustados até que atinja o resultado desejado.

2.1. Dataset

Os dados são o combustível da inteligência artificial. Precisamos de dados de qualidade e em quantidade para um modelo de qualidade e, quanto maior o modelo, mais isso se aplica. Quando juntamos os dados, chamamos esse conjunto de *dataset*. Ele é o que será alimentado à rede durante o treinamento.

2.1. Big Data

A quantidade de dados digitais produzidos está em um patamar tão elevado que a sua análise exige ferramentas automatizadas. Hoje, existem mais de 5 bilhões de usuários na internet gerando dados [8]. Diariamente, são criados 328.77 milhões de terabytes, 41,666,667 de mensagens são enviadas pelo WhatsApp, 150,000 mensagens são enviadas pelo Facebook, no Instagram são postados 347,222 stories e enviadas 1,388,889 mensagens e 404,444 horas de vídeos são transmitidas na Netflix [9]. Essa quantidade de dados gerados podem também gerar oportunidades, somente em 2022, calcula-se que o Youtube tenha gerado 2.56 bilhões de dólares em receita e que foram gastos mais de 3.7 trilhões

de dólares americanos no comércio digital (*e-commerce*) [8]. Essa grande quantidade de dados é o que chamamos de *Big Data*. Eles podem vir de diferentes fontes e estar em diferentes formatos, como por exemplo em Banco de Dados convencionais, tabelas, texto escritos, imagens, vídeos, arquivos de áudio, etc. Sua análise é complexa e geralmente exige ferramentas de inteligência artificial.

2.1. Parâmetros e Hiperparâmetros

É importante distinguir o que são os parâmetros da rede e o que são os hiperparâmetros do modelo. Cada modelo de IA possui um conjunto de “configurações” que podem ser ajustadas, por exemplo, função de ativação, número de camadas, número de neurônios, entre outros. Esses ajustes são chamados de hiperparâmetros e é quem irá treinar a rede que vai fazer o *fine tuning* (um ajuste fino desses valores) para que a rede se comporte do jeito esperado. Já os parâmetros da rede são os valores internos que a rede irá aprender por conta própria, esses são os valores que ela irá procurar para que o resultado atinja o alvo, em outras palavras, eles são os valores descobertos e atualizados pela rede em cada interação de treino.

2.1. *Overfitting* e *Underfitting*

Um modelo de qualidade deve achar uma hipótese que melhor se ajusta aos dados de treino e, o mais importante, se generaliza para dados novos [10]. Por exemplo, quando treinamos um modelo para detectar gatos em uma foto, queremos um modelo que ache a melhor forma de identificar que tem um gato naquela foto, mas também queremos um modelo que quando apareça um gato que não estava no treinamento, ele também identifique. Quando nosso modelo começa a ter um desempenho excelente nos dados de treino, mas ruim em dados que nunca viu antes, nós falamos que esse modelo está em *overfitting*. Utilizando o exemplo anterior, seria como se o modelo conhecesse cada característica dos gatos no seu treino, como manchas, postura, raça, cor dos olhos, mas quando ele é apresentado a um gato diferente que não estava no treinamento, ele não encontra essas características e retorna que não há gato ali. Essa situação é muito comum quando aumentamos a complexidade do modelo adicionando um número grande de camadas e não melhorando os dados de treino.

Já no *Underfitting*, a situação que ocorre é que não treinamos o modelo por tempo suficiente, ou então temos poucos exemplos de treinamento, ou até nosso modelo não seja complexo o suficiente, resultando em pouca ou nenhuma generalização. Nesse caso, nossas métricas serão ruins tanto no treino quanto no teste.

3. PRINCIPAIS SUBÁREAS

Por ser um campo grande de estudos, existem outros diversos subcampos que podemos trabalhar. Muitos desses subcampos acabam sendo subáreas dentro de subáreas, como por exemplo o Deep Learning, que é uma subárea do Machine Learning que por sua vez é uma subárea da Inteligência Artificial.

3.1. *Machine Learning*

Aos olhos do público, existe muitas vezes uma confusão entre IA e *Machine Learning*. *Machine Learning* é uma subárea da Inteligência Artificial que estuda a habilidade de melhorar baseado na experiência, aprendendo. Alguns sistemas de IA utilizam isso, outros não. Um agente aprende quando ele melhora sua performance com base em observações sobre o mundo. Quando esse agente é um computador, nós chamamos de *Machine Learning*: um computador observa um conjunto de dados, constrói um modelo baseado nestes dados e usa o modelo tanto como uma hipótese sobre o mundo quanto um software que consegue resolver problemas [10].

3.1.1 Aprendizado Supervisionado

O aprendizado supervisionado funciona buscando um conjunto de modelos de predição que melhor captura a relação entre características descritivas, ou seja, os dados de entrada, com as características alvo, a saída [11]. Em outras palavras, o agente observa as entradas e saídas e aprende a função que mapeia a entrada para a saída. Por exemplo, se o input for uma imagem acompanhada de uma saída de texto dizendo “gato” ou “cachorro”, essa saída nós chamamos de *label*. O agente então realiza o processo de treinamento e acha a função que melhor prediz uma nova imagem. Durante o treinamento, os inputs devem estar acompanhados das labels [10]. Muitas vezes, a parte de criação de labels é feita

por um ser-humano, que alimenta então o modelo, de onde sai o nome supervisionado. Podemos separar o aprendizado supervisionado em 2 categorias: classificação e regressão.

Classificação

A classificação utiliza um algoritmo para atribuir os dados em uma categoria. Ela reconhece entidades específicas dentro de um *dataset* e tenta desenhar uma conclusão de como essas entidades devem ser definidas, sua classe final. Existem alguns algoritmos classificadores muito populares sendo eles [12] listados nos subtópicos a seguir.

- **Classificadores Lineares** - Um classificador linear é um tipo de classe de classificadores que separa os dados a serem classificados utilizando uma reta. Apesar de muito simples, afinal o que esse classificador faz é separar as classes utilizando uma reta [13], ele ainda consegue resolver diversos problemas e serve, em muitos casos, como *baseline* para comparar com outras técnicas. Além de classificação, esse algoritmo também pode ser usado em uma regressão.
- **Support Vector Machines (SVM)** - SVMs são classificadores binários que funcionam na seguinte ideia, os vetores de entrada são mapeados de forma não linear para um espaço de altíssimas dimensões e um hiperplano linear é então desenhado pelo algoritmo separando as classes de forma com que a margem entre o exemplo de treinamento mais próximo e o hiperplano seja maximizado [14]. Esse algoritmo pode ser usado tanto para classificação como para regressão.
- **Árvores de Decisão** - Árvores de decisão são algoritmos hierárquicos, em uma estrutura de árvore, que consiste em um nó raiz, ramos, nós internos e folhas. O nó raiz não possui nenhum ramo chegando a ele e os ramos de saída alimentam os nós subsequentes baseado nas características [15].

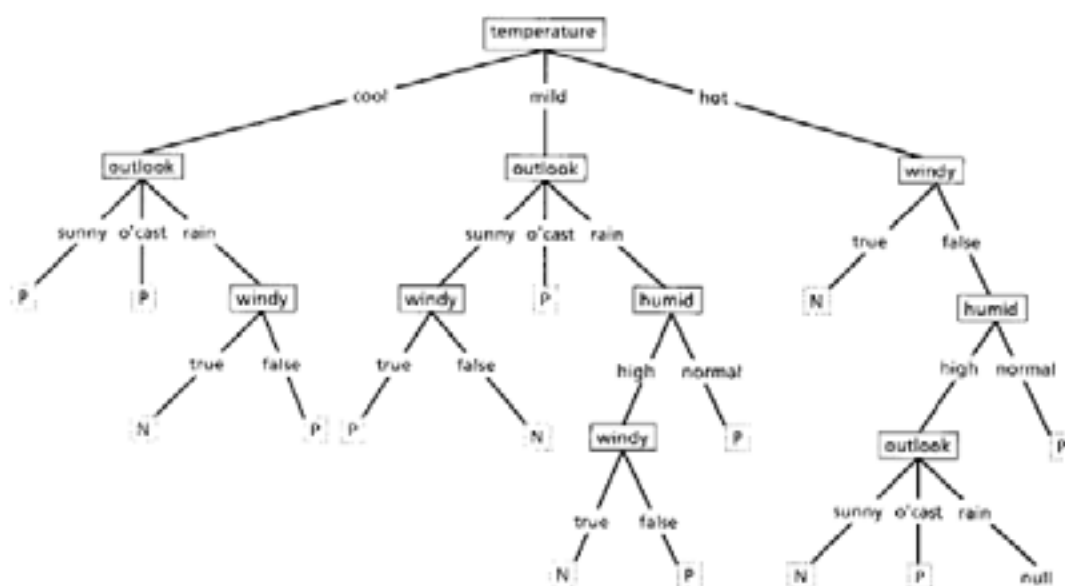


Figura 2: Exemplo de árvore de decisão [15].

- **Random Forest** - Uma *Random Forest*, ou floresta aleatória, é a combinação de árvores de decisão no qual cada árvore depende de dos valores de um vetor aleatório amostrado de forma independente e com a mesma distribuição para todas as árvores na floresta. A seleção das características das árvores é feita de forma aleatória e isso faz com que o erro da generalização do modelo convirja para um valor à medida que a quantidade de árvores se torne grande. A seleção da classe é feita através de uma votação entre as árvores [16].

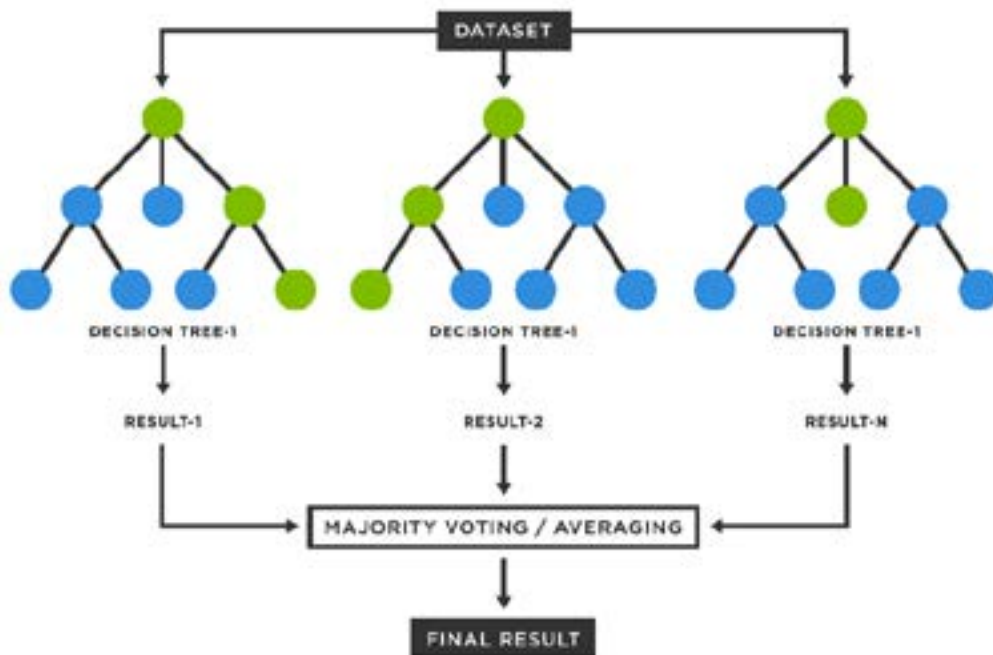


Figura 3: Exemplo de uma *Random Forest* [17].

- *Naive Bayes* - Um classificador *Naive Bayes* (Bayes Ingênuo), ou classificador bayesiano, simplifica o processo de aprendizado fazendo uma suposição, ingênua (por isso *Naive Bayes*), de que as características de uma classe são independentes e, com isso, atribui a classe mais provável descrita pelo seu vetor de características. Apesar de ser uma suposição absurda, ele funciona muito bem em diversos problemas práticos, como classificação de texto, diagnóstico médico e no gerenciamento de desempenho de sistemas [18].

Regressão

A regressão é exatamente igual a classificação, com exceção que a saída, em vez de uma classe, é contínua. A ideia é que os dados de treinamento sejam acondicionados na função que apresenta o menor erro, que pode ser a distância quadrada dos pontos em relação a curva gerada pelo modelo, por exemplo. Exemplos de modelos de regressão são: previsão do preço de uma ação, previsão da idade de um determinado grupo de usuários ou previsão da temperatura em um local específico. Podemos perceber aqui que estamos prevendo valores no domínio real e não classes. Não estamos prevendo, por exemplo, se vai ser frio ou calor, ou se o usuário está ativo ou não [19].

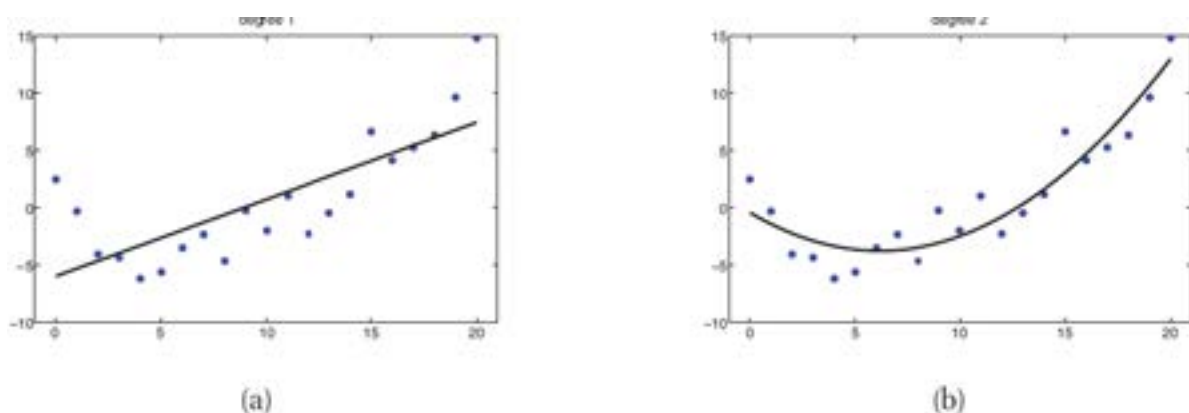


Figura 4: a) Exemplo de uma regressão linear (reta). b) Exemplo de uma regressão polinomial [19].

Podemos também citar alguns modelos populares para regressão.

- **Regressão Linear:** A regressão linear é uma das regressões mais simples que temos. Ela tenta achar a reta que melhor se ajusta aos dados de 2 variáveis utilizando a equação da reta [20]. Podemos

usá-la para dados que se comportam de uma forma que lembre uma reta. Um exemplo pode ser visto na figura 4 (a).

- **Regressão Polinomial:** A regressão polinomial é similar à regressão linear, com a diferença que agora iremos tentar ajustar os dados a uma função de grau 2 ou maior. Um exemplo pode ser visto na figura 4 (b).

Também podemos usar os algoritmos vistos na classificação para regressão. Muitas vezes o que muda é a última camada da rede.

3.1.2 Aprendizado Não Supervisionado

No aprendizado não supervisionado, os agentes aprendem os padrões da entrada sem nenhum *feedback* explícito. O método mais comum dessa técnica é a clusterização (ou segmentação), onde os dados de entrada são agrupados em clusters únicos [10]. Esse método é muito utilizado quando queremos segmentar, por exemplo, conteúdos, consumidores ou outro tipo de classe que possuem similaridades, como é feito pela Netflix que agrupa conteúdo similar e assim recomenda para os usuários o conteúdo de determinado cluster [21]. O agrupamento é feito sem intervenção humana e é capaz de achar padrões escondidos dentro dos dados, sendo também muito utilizado para análise exploratória de dados, estratégias de venda cruzada (*cross-selling*) e reconhecimento de imagens. Um algoritmo muito utilizado nessa estratégia é o *k-means* [22][23].

- **K-Means:** O algoritmo *k-means* é um dos modelos de *clustering* mais populares que existe. Os dados são agrupados em um número *k* de grupos, baseado na distância dos vizinhos à centróide de cada grupo [24].

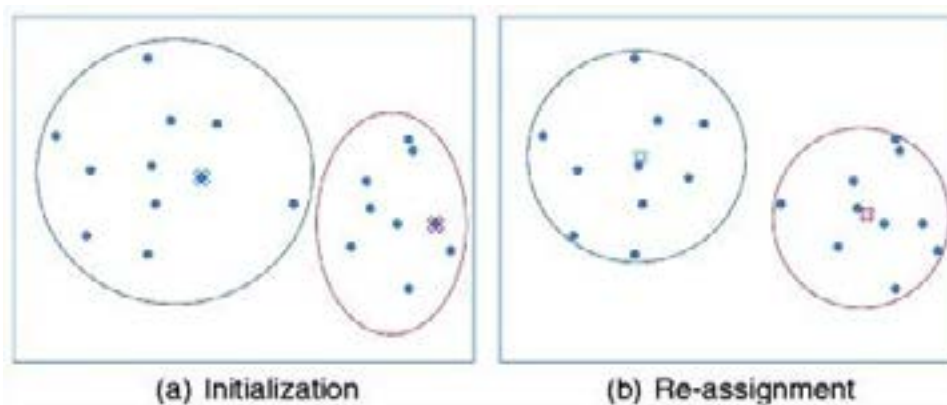


Figura 5: Exemplo de um *k-means* com $k = 2$ [24].

3.1.3 Aprendizado por Reforço

No aprendizado por reforço, o agente aprende através de uma série de reforços, como premiação e punição. Isso permite que o agente aprenda em um ambiente interativo através de tentativa e erro. O problema básico do aprendizado por reforço é descrito em alguns termos chaves:

- **Ambiente:** o mundo que o agente opera;
- **Estado:** a situação atual do agente;
- **Recompensa:** o *feedback* do ambiente;
- **Política:** o método utilizado para mapear as ações do agente;
- **Valor:** a recompensa futura que o agente receberá para uma determinada ação realizada.

É o próprio agente que determina qual ação deve tomar e quais correções devem ser feitas. Uma forma muito útil de visualizar é através de jogos, como por exemplo o xadrez. É dito ao agente que venceu (recompensa) ou perde (punição). As jogadas, caminhos e estratégia cabe ao agente [10][25].

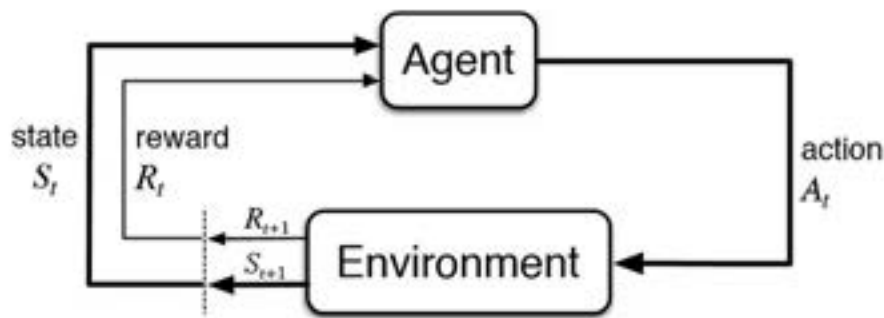


Figura 5: Aprendizado por reforço [25].

3.2. Redes Neurais

Redes neurais são técnicas de machine learning populares com nós interconectados que tentam simular o mecanismo de aprendizado de seres biológicos. Uma rede neural computa a função das entradas propagando os valores calculados de um neurônio de entrada para um neurônio de saída e usando os pesos como parâmetros intermediários. O aprendizado ocorre pela mudança dos pesos que conectam os neurônios [26].

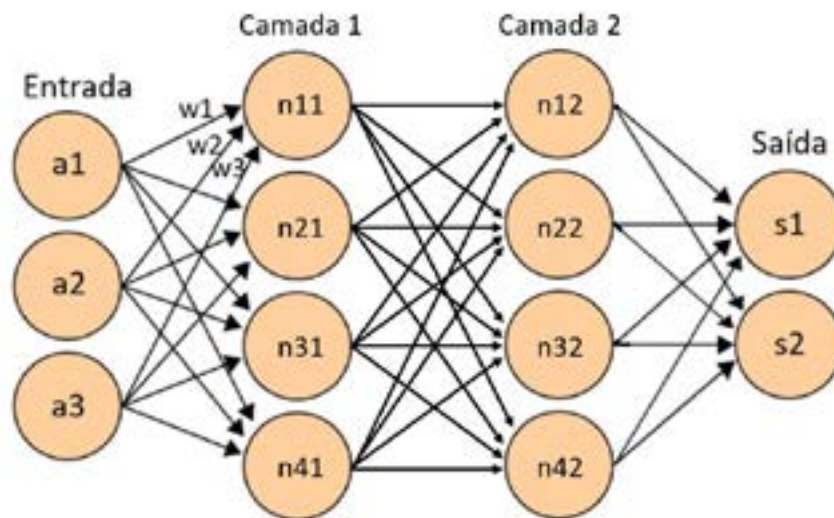


Figura 5: Exemplo de rede neural, onde $a[n]$ são os neurônios de entrada, $s[n]$ de saída, $n[n]$ são os neurônios internos, e $w[n]$ os pesos [26].

A função da rede é resultado da computação cascadeada dos nós (ou neurônios) individuais através da definição correta dos pesos. Ela aprende como relacionar um ou mais entradas em uma ou mais saídas usando exemplos na entrada. Através dessa técnica, é possível computar praticamente qualquer função de entrada até a saída. As redes podem ser de camada única ou multicamadas. Quando temos uma rede neural de camada única, chamamos de Perceptron [26].

Chamamos cada nó de uma unidade. Uma unidade, tradicionalmente, calcula a soma dos pesos da entrada do seu antecessor e então aplica uma função de ativação não linear para produzir uma saída [27]. As redes neurais podem ser definidas em diferentes tipos, dependendo a sua função, e são utilizadas em situações específicas.

3.2.1 Redes Convolucionais (CNN)

Uma rede neural convolucional, são redes em que contém conexões espacialmente locais, pelo menos nas camadas iniciais, e possuem um padrão de pesos que são replicados através das unidades em cada camada. Um padrão de pesos que é replicado através das unidades é chamado de *kernel* e o processo de aplicar o kernel em uma matriz (ou tensor) é chamado de convolução. Esse tipo de técnica

é muito usado para trabalhar com imagens, conseguindo extrair características necessárias para o uso da rede. Elas foram baseadas em modelos do córtex visual que foram propostos pela neurociência [10].

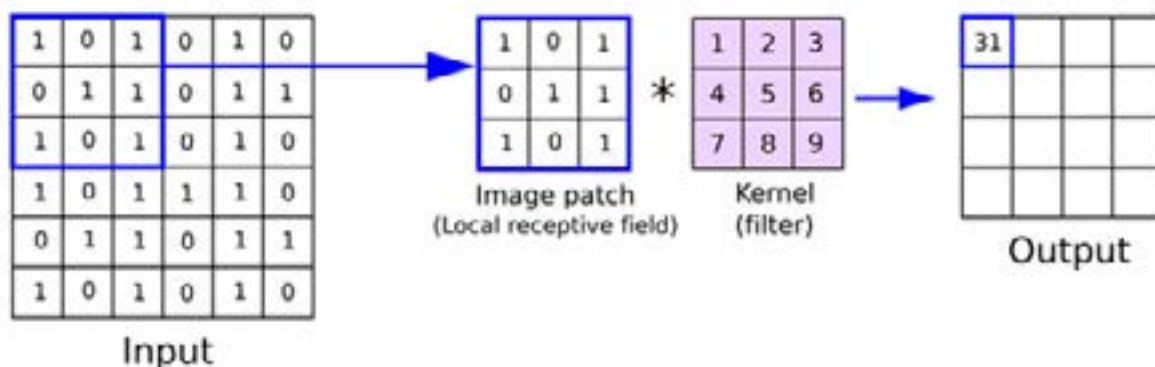


Figura 6: Exemplo de aplicação de uma convolução [28].

3.2.1 Redes Neurais Recorrentes (RNN)

Redes Neurais Recorrentes são redes muito utilizadas em séries temporais e também em sequências, como por exemplo em textos. Elas diferem das redes neurais comuns adicionando um ciclo, onde o resultado da entrada depende dos estados passados, ou seja, a entrada da minha rede será os dados mais a saída passada da minha rede. Esse sistema permite que as RNN possuam um estado interno, ou memória interna, já que as entradas passadas influenciam a entrada atual. Elas são os blocos fundamentais para modelos de atenção, como os presentes em LLM (*Large Language Models*, ou Modelos de Língua Grandes), modelos gigantes como BERT e GPT-4 (base do ChatGPT) [10].

3.3. Deep Learning

Deep Learning, são redes profundas, redes neurais onde temos uma grande quantidade de camadas e parâmetros (geralmente milhões de parâmetros) [19]. De acordo com a estatística clássica, à medida que aumentamos o número de camadas de um modelo, este aumenta sua acurácia até um ponto e depois decai. O que a Deep Learning mostrou foi que esse comportamento não é necessariamente verdade. A acurácia realmente decai porém, à medida que continuamos aumentando, a acurácia volta a aumentar e até passar o pico anterior. Hoje, os principais modelos são baseado em redes profundas, como Dall-E e Midjourney, modelos capazes de criar arte com base em uma entrada de texto, e o ChatGPT, um modelo de língua capaz de uma conversação muito similar a humanos, podendo responder diversos tipos de perguntas e até mesmo criar histórias, música e código de computador.

3.4. Processamento de Linguagem Natural (NLP)

A Natural Language Processing (NLP, ou Processamento de Linguagem Natural em tradução livre), é um braço de estudo da Inteligência Artificial que dá à máquina o poder de entender a linguagem humana (linguagem natural). Ela é importante pois permite que o computador faça análises profundas e retire contexto de textos e áudios falados, permitindo a tradução automática, sumarização de texto, análise de sentimento, remoção de conteúdo, criação de *chatbots* (robôs de conversação) e até a resposta de perguntas [29]. A Deep Learning traz um grande impacto em aplicações de Processamento de Linguagem Natural, como tradução de textos e reconhecimento de discurso, adicionando uma capacidade de generalização e robustez muito grande [10].

3.5. Visão Computacional (CV)

A Computer Vision (CV, ou Visão Computacional em tradução livre) é uma área de estudo da Inteligência Artificial, assim como a NLP. Ela foca em replicar a complexidade da visão humana à máquina, permitindo ao computador identificar processos e objetos em imagens e vídeos, assim como o ser humano faz. Ela permitiu a criação de tecnologias disruptivas como os veículos autônomos. A CV também pode ser usada para controle de qualidade, contagem de objetos, identificação de ações (correr, cozinhar, deitar...) e gestos, identificação de falhas e remoção de conteúdo ilegal. A Visão

Computacional é a área que mais impacta a Deep Learning, e vice-versa [30][10].

4. USO NA INDÚSTRIA

As tecnologias de Inteligência Artificial estão se espalhando do consumidor para os negócios. A indústria será o setor que mais criará dados, aproximadamente 1.8 petabytes, ou 1.8×10^6 gigabytes, por ano. Isso é mais do que os setores de comunicação e finanças, que hoje é um das lideranças na adoção de IA. Há uma grande esperança da indústria na IA, em uma pesquisa de uma empresa de consultoria, 93% das indústrias entrevistadas falaram acreditar que a IA será a tecnologia pivô para dirigir o crescimento e a inovação no setor. A mesma pesquisa mostrou que 83% das companhias traz, ou trará, algum impacto prático e visível e, dentro destes, 27% disseram que a IA já trouxe algum impacto em suas empresas e 56% pensam que ela trará nos próximos 2 a 5 anos. Podemos ver que é inegável os avanços que a IA vem fazendo, com isso, vamos listar algumas áreas de pesquisa que já estão sendo desenvolvidas e implementadas nas indústrias [31].

4.1. Detecção de Defeitos

A ZDM (do inglês Zero Defect Manufacturing, ou Manufatura sem defeitos em tradução livre) é um componente chave da indústria inteligente. Ela busca desenvolver uma linha de produção sem paradas devido a defeitos nos produtos ou falhas operacionais. Os produtos são inspecionados múltiplas vezes durante a produção e medidas são coletadas via uma rede de sensores distribuída e transmitida. Os sistemas de metrologia tradicionais são prejudicados pela ambiguidade de dados, taxa de amostragem limitada e capacidade de processamento de dados. O uso da IA na metrologia vem para tentar mitigar esses problemas e melhorar a capacidade de detecção de falhas. Várias técnicas de IA podem ser utilizadas para esse fim, como Random Forests, Redes Neurais e Árvores de Regressão [32], como mostrado em [33].

Podemos também usar o poder da Visão Computacional para detectar problemas através de imagens. A ideia nesse caso é utilizar fotos, ou até vídeos, e técnicas avançadas, como redes convolucionais, para detectar alguma anomalia auxiliando um operador ou até mesmo sem a intervenção humana. Como o computador pode enxergar um espectro de cor maior que o ser humano, as imagens podem ser fotos comuns, de duas dimensões no espectro RGB, podem ser imagens, infravermelhas ou em outro espectro não visível para o ser humano e podem até ser imagens 3D ou vídeos (ou seja, imagens adicionadas de uma dimensão de tempo) [34].

4.2. Manufatura Customizada

O paradigma de produção em massa atual não suporta a flexibilidade para satisfazer os requerimentos individuais dos consumidores. Com a chegada das *Smart Factories*, uma nova multivariabilidade de modos de produção em pequenos lotes começou a ser desenvolvido. A IA tem um grande papel nesse novo modo de fabricar, adicionando maior valor agregado acelerando a integração de produtos e tecnologias da informação e comunicação, incluindo computação, comunicação e controle. Os modelos de IA demonstraram seu potencial em áreas como design de produtos customizados, fabricação customizada de produtos, manutenção de manufatura, gerenciamento de clientes, logística, pós-venda e análise de mercado. Por enquanto, as soluções em IA para manufatura customizada estão mais voltadas a processamento de *big data* e em comunicação e informação [35].

Muitos trabalhos desenvolvidos hoje são baseados em agentes inteligentes, que podem constantemente e de forma autônoma em um sistema colaborativo. Um sistema multi-agente pode agir e tomar decisões e ações por conta própria. Um agente pode ser uma câmera de controle, outro o motor de uma esteira, outro um forno e assim por diante, eles podem conversar entre si em busca dos melhores parâmetros de funcionamento [36-38].

4.3. Manutenção Preditiva - Detecção de Falhas de Equipamentos

A manutenção preditiva de equipamentos pode perceber a degradação de performance de um equipamento. A detecção de falhas é o maior desafio na manutenção preditiva, mas pode ser mitigada utilizando IoT e Inteligência Artificial. Um número suficientemente grande de sensores são adicionados ao maquinário e dispositivos coletam esses dados enviando-os continuamente. Um modelo de IA para detecção de falhas utiliza esses dados, processa e dá uma resposta ao usuário final. Devido a

quantidade de dados gigantescas que esses sensores geram com o tempo, somente um modelo de IA consegue realizar esse trabalho de forma eficaz. O resultado dessa união é que conseguimos diminuir o tempo de máquina parada devido a falhas graves. Um operador humano é avisado antes mesmo que a máquina entre em um estado crítico e pode fazer a manutenção preditiva, que em muitos casos é mais rápida e mais barata que uma falha geral [39].

4.4. Outros Casos

A quantidade de exemplos de uso da IA na indústria é gigantesca. Nos focamos em mostrar alguns dos casos mais desafiadores em que a Inteligência Artificial consegue trabalhar com grandeza. Porém, conseguimos colocá-la basicamente em qualquer área da indústria. Podemos utilizar modelos de séries temporais, como RNNs para prever desde o consumo de energia elétrica, até mesmo o preço das ações ou demanda de pedidos. Podemos também utilizar CNNs para detectar fadiga de colaboradores, acessos irrestritos, contagem de produtos e situações que levem a perigo de acidente de trabalho. Podemos também dar o controle de iluminação e temperatura a uma IA, que consegue detectar o uso de determinado ambiente e fazer o acionamento/desligamento da iluminação e condicionamento do ar. Outro exemplo é a previsão e controle de estoque, economia de combustível com rotas de caminhões, economia com uso de chatbots entre diversos outros exemplos. A verdade é que chega ser muito difícil achar uma área que não consiga ser melhorada com a inteligência artificial.

5. DESAFIOS

Arquitetar, desenvolver e manter uma inteligência artificial no ar traz consigo alguns desafios. Podemos agrupar estes desafios em 2 grandes tipos, desafios técnicos e desafios éticos. Desafios técnicos são aqueles relacionados aos empecilhos relacionados à tecnologia em si que podem surgir, como custos, conhecimento e mão de obra. Desafios éticos são aqueles relacionados a dilemas éticos e conflitos, bem como cenários em que uma escolha difícil deve ser feita [40], são situações que não podem ser resolvidas; decisões entre 2 opções que podem ser moralmente plausíveis mas igualmente problemáticas devido às circunstâncias [41].

5.1. Desafios Técnicos

Desenvolver e aplicar uma solução em inteligência artificial, seja um simples modelo de *machine learning* até grandes redes como GPT-4, exige um trabalho que muitas vezes demanda pessoas de áreas diferentes, um custo agregado que pode ser muito alto e também um conhecimento de pessoas que, hoje, é muito difícil de se encontrar no mercado. Com isso, podemos listar alguns dos principais desafios técnicos encontrados.

5.1.1 Limitação de Recursos

Podemos não ter ideia da dimensão de tamanho e custos que alguns modelos podem chegar. Modelos generalistas, como GPT-4 (base do aplicativo ChatGPT, da OpenAI), possuem um custo de desenvolvimento e manutenção gigantesco. Neste exemplo, calcula-se que o tempo de GPU necessário para treinar o GPT-4 foi de 1 milhão de horas, isso na AWS traria um custo de treinamento de 2.4 milhões de dólares americanos, isso só para o treinamento do modelo propriamente dito uma vez, sem contar custos de pesquisa, pessoal, desenvolvimento e testes. Em caso de uso do modelo pronto, os custos também podem ser bem altos. Em 2021, a empresa Latitude utilizava os serviços da OpenAI para processar as milhões de entradas de seus usuários diariamente, gerando uma conta de 200 mil dólares americanos por mês [42]. Claro que esse é um exemplo extremo de um modelo de *Deep Learning* muito generalista, porém podemos ter uma noção que, dependendo do problema, os custos podem inviabilizar um projeto.

5.1.2 Falta de Mão de Obra Capacitada

Esse talvez seja o tema mais batido quando se fala de desafios na área da computação, porém é um problema que até então continua e, quando falamos da área de inteligência artificial, pode ser ainda agravado. Basta uma rápida pesquisa pelas ferramentas de busca para acharmos casos de problema de mão-de-obra. Em IA, falta talento de todos os níveis, iniciantes, praticantes até os níveis mais altos, com isso o problema de limitação de recurso [43], afinal, pela oferta e demanda, os salários acabam subindo. Uma solução sendo adotada pelas empresas, é treinar e capacitar o pessoal atual, porém

mesmo assim, com o uso cada vez maior da IA, o problema persiste [44].

5.1.3 Qualidade e Escassez dos Dados

A qualidade de um modelo de IA está fortemente relacionada com os seus dados de treinamento. Quanto mais e melhor são os dados de treino e teste, mais provável que o modelo também será melhor. As empresas hoje estão com dificuldades para conseguir esses dados pois ou eles não são de boa qualidade, ou até mesmo são inexistentes. Isso acaba criando um desbalanceamento de classes que gera um problema de viés, resultando em um modelo que pode não funcionar como o planejado [45][46].

5.1.4 Segurança

Com a popularização do uso da IA, seus ataques começaram a ser também mais frequentes e sofisticados. Um ataque a uma rede de inteligência artificial é uma manipulação proposital de sistemas de IA para alterar seu objetivo e causar um mau funcionamento. Podemos atacar tanto a entrada da IA, como por exemplo no caso de ataques adversários, do mesmo tipo que enganou um Tesla a acelerar mais de 30 milhas por hora a mais do limite permitido, quanto envenena-la durante o processo de treinamento, como por exemplo corrompendo ou manipulando os dados de treinamento. Esses ataques, como em sistemas militares, veículos autônomos ou em sistemas hospitalares, podem ter consequências de vida ou morte e devem ser considerados e mitigados ainda na fase de desenho da rede [47][48].

5.2. Desafios Éticos

Além de algumas barreiras técnicas, a área da IA também possui alguns desafios no campo da ética que ainda estão em estudo.

5.2.1 Viés

Viés nada mais que um desbalanceamento que faz com que o modelo acabe adotando um comportamento inadequado. O uso da IA para avaliação de crédito ou liberdade condicional, por exemplo, pode fazer com que decisões sejam baseadas em raça, gênero, ou outras categorias. Esse tipo de problema pode vir diretamente dos dados de treino, que podem estar desbalanceados ou simplesmente são inerentemente enviesados [10]. Um grande exemplo foi quando a Amazon adotou um modelo de machine learning para auxiliar o RH na contratação de colaboradores. Após um tempo, notou-se que o modelo estava adotando um viés machista, dando preferência a currículos masculinos [49].

5.2.2 Vazamento de Dados

Uma técnica muito comum que utilizamos para treinar os modelos, é buscar os dados em fontes abertas, como textos ou imagens da internet ou até mesmo publicações em redes sociais. Porém, alguns modelos trabalham com dados sensíveis, como nome, endereço, telefone e dados médicos. Tais dados costumam ser protegidos por legislações específicas, como a LGDP que protege dados sensíveis de cidadãos da República Federativa do Brasil [50]. Os dados, depois do treino, acabam não ficando diretamente dentro da rede, ou seja, não existe um banco de dados interno que o modelo de IA utiliza. Porém, alguns ataques já conseguem, com uma certa confiança, recuperar os dados de treino através de técnicas de envenenamento da rede [51].

5.2.3 Transparência e Explicabilidade

Para [52] e [53], a transparência é classificada como um requisito não funcional de impacto em um sistema de *software*, tendo uma inter-relação com outros requisitos não funcionais, como privacidade, confiança e segurança. A transparência em IA tem se tornado essencial, mas sua natureza *blackbox*, ou seja, conhecemos suas entradas e saídas, mas seu funcionamento interno não é claro, faz com que a definição de transparência seja um grande desafio [54]. Essa natureza de caixa preta também prejudica, em muitos casos, a explicabilidade de modelos. Isso impede o uso em alguns tipos de aplicações que exigem que o sistema seja mostre como um resultado foi alcançado, como em aplicações médicas [55]. Nesse tipo de aplicação, não basta somente o usuário saber a entrada e a

saída, os passos intermediários são de extrema importância [56].

5.2.4 Responsabilidade

Em 2004, em [57] foi introduzido o que foi chamado de lacuna na responsabilidade de sistemas autônomos. Neste artigo, o autor levanta a questão de que sistemas que aprendem entre si, com a interação com outros agentes inteligentes ou com o ambiente fariam com que o controle e predição de seu comportamento se tornasse muito difícil ou até mesmo impossível. Isto contraria o que a responsabilidade exige, exatamente controle e predição. Atualmente, com a popularização de modelos de IA, que acabaram substituindo problemas tradicionalmente atribuídos a humanos, os riscos de uma lacuna aparecem não somente na capacidade de aprendizado das máquinas, mas principalmente a sua opacidade, complexidade e imprevisibilidade que esses sistemas podem trazer [58]. Um caso muito popular e que mostra o quão esse tema pode ser complexo foram os acidentes ocasionados por veículos autônomos, onde a responsabilidade da empresa, do motorista, ou do modelo se torna obscura em algumas situações [59].

5. CONCLUSÃO

A Inteligência Artificial está ficando cada vez mais presente nos processos industriais. Ela é considerada uma das tecnologias chaves para a quarta revolução industrial, já que ela é capaz de processar e tirar conhecimento do *big data*. Ela também permite a manufatura personalizada e aumenta a eficiência produtiva em níveis sem precedente na história. Existem diversos modelos que podem ser utilizados nas mais diversas situações, mas estes ainda estão fortemente ligados a quantidade e qualidade dos dados de treinamento e teste. Aplicá-la traz grandes desafios, mas seus benefícios podem compensar, já que estamos falando em melhoras significativas de processos, diminuição de custos e aumento de produtividade. A chamada indústria 4.0 está muito baseada na IA, pois a automação já existe, mas colocar inteligência e comunicação é uma grande novidade.

REFERENCES

- [1] YAO, X.; ZHOU, J.; ZHANG, J.; & BOER, C. R. (2017). From Intelligent Manufacturing to Smart Manufacturing for Industry 4.0 Driven by Next Generation Artificial Intelligence and Further On. 2017 5th International Conference on Enterprise Systems (ES), 311–318. <https://doi.org/10.1109/ES.2017.58>.
- [2] JAVAID, M.; HALEEM, A.; SINGH, R. P.; & SUMAN, R. (2022). Artificial Intelligence Applications for Industry 4.0: A Literature-Based Study. *Journal of Industrial Integration and Management*, 07(01), 83–111. <https://doi.org/10.1142/S2424862221300040>
- [3] MANNING, C. (Acesso em 24 de Agosto de 2023). Artificial Intelligence Definitions. <https://hai.stanford.edu/sites/default/files/2020-09/AI-Definitions-HAI.pdf>
- [4] IBM. (Acesso em 26 de Agosto de 2023). What is artificial intelligence. <https://www.ibm.com/topics/artificial-intelligence>
- [5] SEARLE, J. R. (1980). Minds, brains, and programs. *Behavioral and Brain Sciences*, 3(3), 417–424. <https://doi.org/10.1017/S0140525X00005756>
- [6] IBM. (Acesso em 26 de Agosto de 2023). What is strong AI? <https://www.ibm.com/topics/strong-ai>
- [7] SRIVASTAV, S. (2023, August 26). Artificial Intelligence, Machine Learning, and Deep Learning. What's the Real Difference?
- [8] KEMP, S. (Acesso em 26 de Agosto de 2023). Digital 2022: Global Overview Report. <https://datareportal.com/reports/digital-2022-global-overview-report>
- [9] RAYAPROLU, A., & DEFENSOR, G. (Acesso em 26 de Agosto de 2023). How Much Data Is Created Every Day in 2023? <https://techjury.net/blog/how-much-data-is-created-every-day/>
- [10] RUSSELL, S.; NORVIG, P. (2020). *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (4th ed.). Prentice Hall.
- [11] KELLEHER, J. D., & MAC NAMEE, B. (2015). *Fundamentals of Machine Learning for Predictive Data Analytics 2*.
- [12] IBM. (Acesso em 27 de Agosto de 2023). What is supervised learning? <https://www.ibm.com/topics/supervised-learning>
- [13] THEODORIDIS, S.; KOUTROUMBAS, K. (2009). *Pattern Recognition*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-59749-272-0.X0001-2>
- [14] CORTES, C.; VAPNIK, V. (1995). Support-vector networks. *Machine Learning*, 20(3), 273–297. <https://doi.org/10.1007/BF00994018>

- [15] QUINLAN, J. R. (1986). Induction of decision trees. *Machine Learning*, 1(1), 81–106. <https://doi.org/10.1007/BF00116251>
- [16] BREIMAN, L. Random Forests. *Machine Learning* 45, 5–32 (2001). <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- [17] TIBCO. (Acesso em 26 de Agosto de 2023). What is a Random Forest. <https://www.tibco.com/pt-br/reference-center/what-is-a-random-forest>
- [18] RISH, I.; RISH, I. (2001). An Empirical Study of the Naïve Bayes Classifier. <https://www.researchgate.net/publication/228845263>
- [19] MURPHY, K. P. (2012). *Machine learning : a probabilistic perspective*.
- [20] STANTON, J. M. (2001). Galton, Pearson, and the Peas: A Brief History of Linear Regression for Statistics Instructors. *Journal of Statistics Education*, 9(3). <https://doi.org/10.1080/10691898.2001.11910537>
- [21] JAIN, H. (Acesso em 27 de Agosto de 2023). Netflix's Hidden Gems: How Clustering Helps You Find Your New Favorite Shows (Season 1). <https://betterprogramming.pub/netflixs-hidden-gems-how-clustering-helps-you-find-your-new-favorite-shows-season-1-f30cf0e0a1fe>
- [22] MISHRA, S. (2023, August 27). Unsupervised Learning and Data Clustering. <https://towardsdatascience.com/unsupervised-learning-and-data-clustering-eeecb78b422a>
- [23] IBM. (Acessado em 27 de Agosto de 2023). What is supervised learning? <https://www.ibm.com/topics/supervised-learning>
- [24] MANNOR, S.; JIN, X.; HAN, J.; JIN, X.; HAN, J.; JIN, X.; HAN, J.; & ZHANG, X. (2011). K-Means Clustering. In *Encyclopedia of Machine Learning* (pp. 563–564). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-0-387-30164-8_425
- [25] BHATT, S. (Acesso em 27 de Agosto de 2023). Reinforcement Learning 101. <https://towardsdatascience.com/reinforcement-learning-101-e24b50e1d292>
- [26] AGGARWAL, C. C. (2019). *Neural Networks and Deep Learning* (2nd ed.). Springer.
- [27] MCCULLOCH, W. S.; PITTS, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5(4), 115–133. <https://doi.org/10.1007/BF02478259>
- [28] MIN-SOO, G. (2023, August 28). Deep Learning Bible - 2. Classification . <https://wikidocs.net/164365>
- [29] AWS. (Acesso em 29 de Agosto de 2023). O que é processamento de linguagem natural (PLN)? <https://aws.amazon.com/pt/what-is/nlp/>
- [30] MIHAJLOVIC, I. (2023, August 30). Everything You Ever Wanted To Know About Computer Vision. <https://towardsdatascience.com/everything-you-ever-wanted-to-know-about-computer-vision-heres-a-look-why-it-s-so-awesome-e8a58dfb641e>
- [31] DELOITTE. (2023, August 23). Deloitte Survey on AI Adoption in Manufacturing. <https://www2.deloitte.com/cn/en/pages/consumer-industrial-products/articles/ai-manufacturing-application-survey.html>
- [32] PAPAGEORGIOU, E. I.; THEODOSIOU, T.; MARGETIS, G.; DIMITRIOU, N.; CHARALAMPOUS, P.; TZOVARAS, D.; SAMAKOVLIS, I. (2021). Short Survey of Artificial Intelligent Technologies for Defect Detection in Manufacturing. 2021 12th International Conference on Information, Intelligence, Systems & Applications (IISA), 1–7. <https://doi.org/10.1109/IISA52424.2021.9555499>
- [33] PIMENOV, D. Yu.; BUSTILLO, A.; MIKOLAJCZYK, T. (2018). Artificial intelligence for automatic prediction of required surface roughness by monitoring wear on face mill teeth. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 29(5), 1045–1061. <https://doi.org/10.1007/s10845-017-1381-8>
- [34] LIU, C.; WANG, R.; KONG, Z.; BABU, S.; JOSLIN, C.; FERGUSON, J.; TECH, V. (2019). Real-time 3D Surface Measurement in Additive Manufacturing Using Deep Learning Manufacturing.
- [35] WAN, J.; Li, X.; DAI, H.-N.; KUSIAK, A.; MARTINEZ-GARCIA, M.; LI, D. (2021). Artificial-Intelligence-Driven Customized Manufacturing Factory: Key Technologies, Applications, and Challenges. *Proceedings of the IEEE*, 109(4), 377–398. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2020.3034808>
- [36] GIRET, A.; TRENTESAUX, D.; SALIDO, M. A.; GARCIA, E.; ADAM, E. (2017). A holonic multi-agent methodology to design sustainable intelligent manufacturing control systems. *Journal of Cleaner Production*, 167, 1370–1386. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.079>
- [37] KUMARI, S.; SINGH, A.; MISHRA, N.; GARZA-REYES, J. A. (2015). A multi-agent architecture for outsourcing SMEs manufacturing supply chain. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 36, 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2014.12.009>
- [38] WANG, S.; WAN, J.; ZHANG, D.; Li, D.; ZHANG, C. (2016). Towards smart factory for industry 4.0: a self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination. *Computer Networks*, 101, 158–168. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2015.12.017>
- [39] LIU, Y.; YU, W.; DILLON, T.; RAHAYU, W.; LI, M. (2022). Empowering IoT Predictive Maintenance Solutions With AI: A Distributed System for Manufacturing Plant-Wide Monitoring. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 18(2), 1345–1354. <https://doi.org/10.1109/TII.2021.3091774>

- [40] SCHOFIELD, G.; DITTBORN, M.; SELMAN, L. E.; HUXTABLE, R. (2021). Defining ethical challenge(s) in healthcare research: a rapid review. *BMC Medical Ethics*, 22(1). <https://doi.org/10.1186/s12910-021-00700-9>
- [41] JIA, Y.; CHEN, O.; XIAO, Z.; XIAO, J.; BIAN, J.; JIA, H. (2021). Nurses' ethical challenges caring for people with COVID-19: A qualitative study. *Nursing Ethics*, 28(1), 33–45. <https://doi.org/10.1177/0969733020944453>
- [42] VANIAN, J.; LESWING, K. (Acesso em 25 de Agosto de 2023). ChatGPT and generative AI are booming, but the costs can be extraordinary. <https://www.cnbc.com/2023/03/13/chatgpt-and-generative-ai-are-booming-but-at-a-very-expensive-price.html>
- [43] JARVIS, D. (Acesso em 25 de Agosto de 2023). The AI Talent Shortage Isn't Over Yet. <https://deloitte.wsj.com/articles/the-ai-talent-shortage-isnt-over-yet-01602874929>
- [44] HYPERIGHT. (Acesso em 25 de Agosto de 2023). Expert PoV: How can we solve the AI skills shortage? <https://hyperight.com/expert-pov-how-can-we-solve-the-ai-skills-shortage/>
- [45] PAPPAS, C. (Acesso em 25 de Agosto de 2023). 6 AI Implementation Challenges And How To Overcome Them. <https://elearningindustry.com/ai-implementation-challenges-and-how-to-overcome-them>
- [46] VADAPALLI, P. (Acesso em 25 de Agosto de 2023). Top 7 Challenges in Artificial Intelligence in 2023. <https://www.upgrad.com/blog/top-challenges-in-artificial-intelligence/>
- [47] O'NEILL, P. H. (Acesso em 25 de Agosto de 2023). Hackers can trick a Tesla into accelerating by 50 miles per hour. <https://www.technologyreview.com/2020/02/19/868188/hackers-can-trick-a-tesla-into-accelerating-by-50-miles-per-hour/>
- [48] COMITER, M. (2019). Attacking Artificial Intelligence AI's Security Vulnerability and What Policymakers Can Do About It.
- [49] DASTIN, J. (Acesso em 25 de Agosto de 2023). Amazon scraps secret AI recruiting tool that showed bias against women. <https://www.reuters.com/article/us-amazon-com-jobs-automation-insight-idUSKCN1MK08G>
- [50] REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL, Lei Geral de Proteção de Dados, Pub. L. No. 13.709 (2018).
- [51] TRAMÈR, F.; SHOKRI, R.; JOAQUIN, A. S.; LE, H.; JAGIELSKI, M.; HONG, S.; CARLINI, N. (2022). Truth Serum: Poisoning Machine Learning Models to Reveal Their Secrets.
- [52] CYSNEIROS, L. M.; RAFFI, M.; SAMPAIO DO PRADO LEITE, J. C. (2018). Software Transparency as a Key Requirement for Self-Driving Cars. 2018 IEEE 26th International Requirements Engineering Conference (RE), 382–387. <https://doi.org/10.1109/RE.2018.00-21>
- [53] LEITE, J. C. S. do P.; CAPPELLI, C. (2010). Software Transparency. *Business & Information Systems Engineering*, 2(3), 127–139. <https://doi.org/10.1007/s12599-010-0102-z>
- [54] BALASUBRAMANIAM, N.; KAUPPINEN, M.; RANNISTO, A.; HIEKKANEN, K.; KUJALA, S. (2023). Transparency and explainability of AI systems: From ethical guidelines to requirements. *Information and Software Technology*, 159, 107197. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2023.107197>
- [55] SIWICKI, B. (Acesso em 26 de Agosto de 2023). Healthcare must set guardrails around AI for transparency and safety. <https://www.healthcareitnews.com/news/healthcare-must-set-guardrails-around-ai-transparency-and-safety>
- [56] DURÁN, J. M.; JONGSMA, K. R. (2021). Who is afraid of black box algorithms? On the epistemological and ethical basis of trust in medical AI. *Journal of Medical Ethics*, medethics-2020-106820. <https://doi.org/10.1136/medethics-2020-106820>
- [57] MATTHIAS, A. (2004). The responsibility gap: Ascribing responsibility for the actions of learning automata. *Ethics and Information Technology*, 6(3), 175–183. <https://doi.org/10.1007/s10676-004-3422-1>
- [58] SANTONI de Sio, F.; MECACCI, G. (2021). Four Responsibility Gaps with Artificial Intelligence: Why they Matter and How to Address them. *Philosophy & Technology*, 34(4), 1057–1084. <https://doi.org/10.1007/s13347-021-00450-x>
- [59] SIDDIQUI, F.; MERRILL, J. B. (Acesso em 26 de Agosto de 2023). 17 fatalities, 736 crashes: The shocking toll of Tesla's Autopilot. <https://www.washingtonpost.com/technology/2023/06/10/tesla-autopilot-crashes-elon-musk/>



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil
26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

Processo de União de Chapas Metálicas por Conformação: uma revisão sobre o Clinching *Metal Sheet Joining by Forming Process: A Review on Clinching*

João Vinícius de Souza Vares ⁽¹⁾

Rafael Pandolfo da Rocha ⁽²⁾

Halston José Mozetic ⁽³⁾

Lírio Schaeffer ⁽⁴⁾

RESUMO

O processo de união de chapas metálicas por conformação, conhecido como clinching, tem sido amplamente estudado e aplicado devido às suas vantagens em termos de custo, simplicidade e eficiência. Nesta revisão, apresentamos uma análise abrangente sobre o clinching, abordando seus princípios fundamentais, etapas do processo e suas diversas aplicações industriais. O clinching é um método de união mecânica que envolve a deformação plástica das chapas metálicas por meio de punções e matrizes. Ao contrário de outras técnicas de união, o clinching não requer o uso de adesivos, soldas ou elementos de fixação adicionais, o que resulta em economia de tempo e custo. Além disso, o clinching permite a união de materiais diferentes, como aço e alumínio, ampliando suas aplicações em setores como a indústria automotiva, aeroespacial, construção civil e eletrodomésticos. Nesta revisão, discutimos os fatores-chave que influenciam a qualidade das juntas clinchadas, incluindo a geometria das ferramentas, as propriedades dos materiais, as condições de processo e os parâmetros de clinching. Também destacamos as propriedades mecânicas das juntas clinchadas, como resistência ao cisalhamento e fadiga, bem como os avanços recentes na tecnologia do clinching, como o desenvolvimento de ferramentas mais eficientes e a otimização dos parâmetros de processo. Em resumo, esta revisão abrange os principais aspectos do processo de união de chapas metálicas por clinching, enfatizando sua aplicabilidade e benefícios na indústria. A compreensão dos princípios e melhores práticas do clinching pode auxiliar engenheiros e profissionais da área na seleção e implementação adequada desse processo de união, resultando em juntas de alta qualidade e desempenho.

Palavras-chave — Clinching, União de chapas metálicas, Deformação plástica, Indústria automotiva.

⁽¹⁾ Perito Criminal Oficial, MSc. Engenheiro Metalúrgico e Mecânico, Instituto-Geral de Perícias do Rio Grande do Sul, Brasil

⁽²⁾ MSc. Engenheiro Mecânico, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

⁽³⁾ Dr. Engenheiro Mecânico, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

⁽⁴⁾ Prof. Dr.-Ing, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

ABSTRACT

The process of joining metal sheets through forming, known as clinching, has been widely studied and applied due to its advantages in terms of cost, simplicity, and efficiency. In this review, we present a comprehensive analysis of clinching, addressing its fundamental principles, process stages, and its various industrial applications. Clinching is a mechanical joining method that involves the plastic deformation of metal sheets using punches and dies. Unlike other joining techniques, clinching does not require the use of adhesives, welds, or additional fastening elements, resulting in time and cost savings. Furthermore, clinching allows for the joining of different materials, such as steel and aluminum, broadening its applications in sectors like the automotive industry, aerospace, civil construction, and home appliances. In this review, we discuss the key factors influencing the quality of clinched joints, including tool geometry, material properties, process conditions, and clinching parameters. We also highlight the mechanical properties of clinched joints, such as shear resistance and fatigue, as well as recent advances in clinching technology, like the development of more efficient tools and the optimization of process parameters. In summary, this review covers the main aspects of the metal sheet joining process by clinching, emphasizing its applicability and benefits in the industry. Understanding the principles and best practices of clinching can assist engineers and professionals in the field in the proper selection and implementation of this joining process, resulting in high-quality and high-performance joints.

Key words — Clinching, Metal sheet joining, Plastic deformation, Automotive industry.

1. INTRODUÇÃO

Na indústria, especialmente a metalmecânica, é imprescindível o emprego de métodos de união de componentes metálicos. Na fabricação de produtos que são formados por peças de chapas, tubos ou perfis, não só é importante produzir tais componentes através de um processo eficiente como também é imprescindível usar um processo adequado para a junção destes componentes. A indústria automotiva, notadamente, tem a necessidade de promover a união de componentes, sobretudo chapas metálicas, a título de exemplo, na construção das carrocerias dos veículos. Tal necessidade é comum nas indústrias da linha branca, em que são utilizadas predominantemente chapas de aço de baixo teor de carbono na fabricação de eletrodomésticos e bens de consumo em geral, assim como nos setores de estruturas metálicas, embalagens entre outros [1].

Nos últimos anos, a redução de massa dos automóveis se tornou uma demanda mundial em razão da poluição ambiental e a escassez de energia. As demandas por redução de custo, de massa, de consumo de combustível, da poluição atmosférica e melhora da segurança são, cada vez mais, um imperativo na indústria automotiva. Nessa linha, as ligas de alumínio apresentam vantagens como baixa densidade, proporcionando redução de massa, boa capacidade de absorção de energia em casos de colisão e têm aumentado sua proporção nas carrocerias ano após ano. Com isso, as tradicionais carrocerias de aço vêm se desenvolvendo em uma combinação aço-alumínio. A título de ilustração, a proporção de aço e ligas de alumínio na carroceria do Audi TT/TTS Coupé é de 35,8% e 62,6%, respectivamente. Conseqüentemente, processos de união de chapas metálicas de aço e alumínio são um aspecto bastante relevante na indústria [2].

O clinching, um método inovador de união de chapas metálicas por meio da conformação, tem ganhado destaque no cenário da manufatura devido a suas características distintas e benefícios inerentes. Diferentemente das técnicas convencionais de união, como soldagem ou uso de adesivos, o clinching aproveita a deformação plástica das chapas metálicas usando punções e matrizes para criar juntas de alta resistência [3].

Um dos principais atrativos do clinching é sua capacidade de oferecer economias significativas em termos de tempo e custo, já que elimina a necessidade de adesivos, soldas ou elementos de fixação adicionais. Além disso, sua versatilidade em unir diferentes tipos de materiais, como aço e alumínio, ampliou seu uso em várias indústrias, incluindo automotiva, aeroespacial, construção civil e fabricação de eletrodomésticos [4].

A qualidade de uma junta clinchada é influenciada por uma combinação de fatores, desde a geometria das ferramentas utilizadas até as propriedades inerentes dos materiais em questão. Adicionalmente, condições de processo e parâmetros específicos de clinching desempenham um papel crucial na determinação da resistência ao cisalhamento, fadiga e outras propriedades mecânicas da junta [5].

Portanto, este trabalho visa promover o método de união de materiais diferentes através da conformação a frio, uma vez que tal abordagem melhora as características mecânicas dos materiais envolvidos. Além disso, destaca-se a relevância dos avanços nos processos de manufatura automatizada nas indústrias aeronáutica, de eletrodomésticos e automobilística.

2. FUNDAMENTOS DO CLINCHING

No processo de união de chapas metálicas, destaca-se o clinching devido às suas características peculiares e abordagem inovadora. Embora essa técnica não seja recente, observa-se uma atenção crescente a ela em virtude de seus múltiplos benefícios e aplicações práticas. Neste capítulo, serão abordados os fundamentos subjacentes ao clinching, explorando-se seus princípios básicos e os mecanismos que determinam sua eficácia. A compreensão aprofundada destes conceitos é fundamental tanto para a familiarização com a técnica quanto para a otimização de suas aplicações.

2.1. Princípios Básicos e Mecanismos

O clinching baseia-se no travamento mecânico entre dois ou mais elementos por meio da deformação plástica, induzida por uma ferramenta fabricada de material mais resistente que os componentes em questão. Durante o clinching, as chapas, independentemente de estarem pintadas ou não, não exigem preparação prévia de superfície, e a combinação de suas espessuras pode alcançar até seis milímetros [6].

Conforme Carboni et al. [6], o processo de união de chapas metálicas por conformação a frio baseia-se fundamentalmente no travamento mecânico entre dois ou mais componentes, sejam eles do mesmo material ou não, mediante deformação plástica. Esta deformação é induzida por uma ferramenta fabricada de um material mais resistente que os componentes da junção. O objetivo da união de chapas metálicas por conformação a frio é conectar chapas metálicas utilizando deformações plásticas localizadas, evitando o aquecimento da área de união, ao contrário do que ocorre em junções soldadas.

A Figura 1 mostra um exemplo do processo de clinching, em que a peça que se movimenta é o punção (Figura 1a), ele pressiona o conjunto de chapas contra a matriz que está fixa abaixo do conjunto. Essa compressão promove o preenchimento do fundo da matriz (Figura 1b), o que provoca o escoamento do material para a periferia e conseqüente formação da região de travamento (Figura 1c). Ao final da conformação o punção retorna à posição inicial, estando a junta finalizada (Figura 1d).

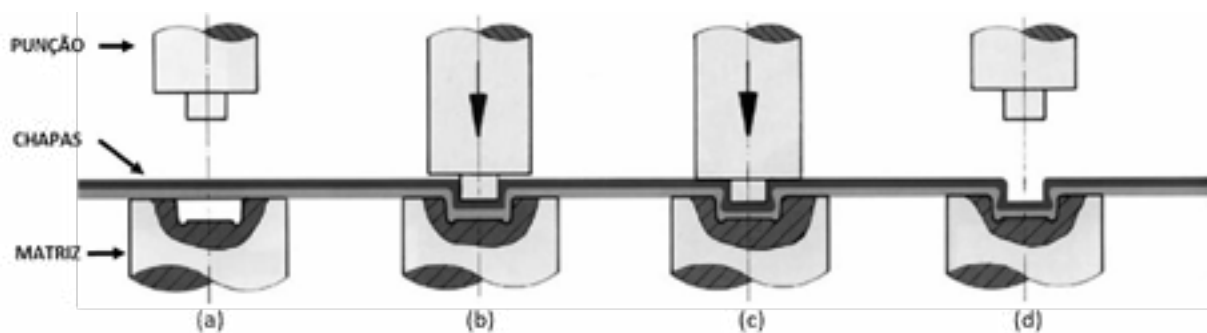


Figura 1 Processo de clinching. Adaptado de [7].

A resistência mecânica da junção das chapas unidas pelo clinching é fundamentalmente determinada por dois parâmetros geométricos da junta obtida, que são eles: a espessura do pescoço e

a espessura de entrosamento. A primeira se refere à espessura da chapa superior após a conformação e a segunda à medida de quanto o material da chapa superior penetrou na chapa inferior, conforme ilustrado na representação da Figura 2 [8].

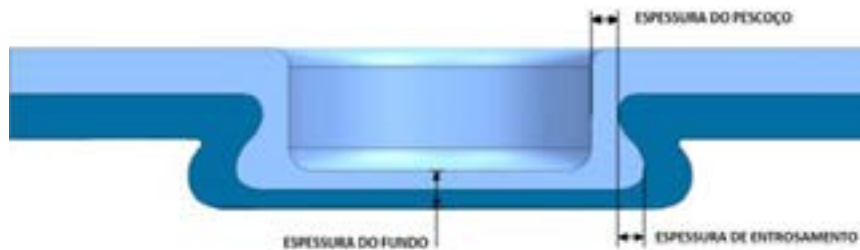


Figura 2 - Esquema da seção transversal de uma junta obtida por *clinching*. Adaptado [8].

2.2. Clinching – Tipos de união

De acordo com a norma DIN 8593-5 [9], o processo de clinching resulta em uma união por conformação, na qual a aplicação de uma carga no punção gera a compressão das chapas na matriz e o entrosamento através da deformação plástica do material e pode ser subclassificado em categorias.

Na classe que não faz uso de material auxiliar, não há adição de elementos de fixação durante o processo de união. A união é formada apenas pelo travamento mecânico das chapas. O formato resultante das juntas pode ser observado na Figura 3.

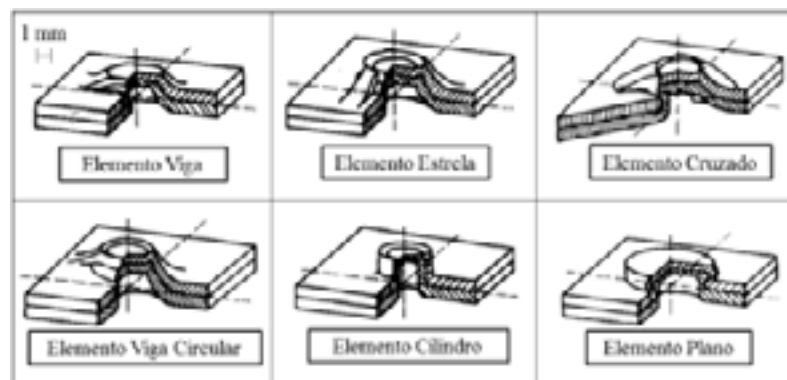


Figura 3 Processo de clinching e seus elementos de junta sem material auxiliar. Adaptado de [10].

Na classe que faz uso de material auxiliar, isto é, com adição de um elemento de fixação que pode ser feito tanto pelo processo de autopenetração quanto por autorrebitagem, tem-se um exemplo na Figura 4.

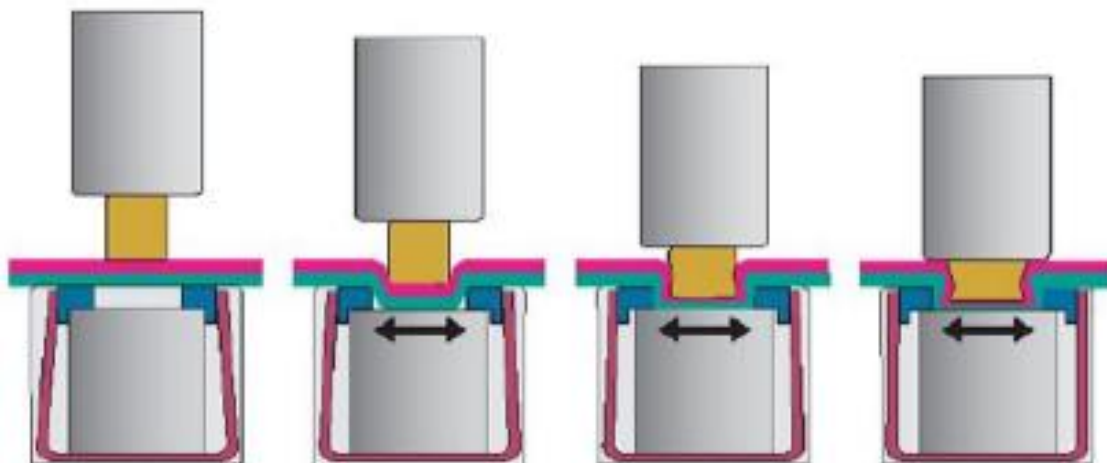


Figura 4 Processo de clinching e seus elementos de junta com material auxiliar. Adaptado de [11].

No clinching circular, o intertravamento das chapas metálicas é contínuo ao longo da circunferência, evitando cortes parciais nas chapas. Esta característica geométrica não só previne a permeação de fluidos e gases, mas também garante um excelente desempenho sob cargas cíclicas [12]. Em termos visuais, esta forma de clinching se manifesta como uma indentação circular onde as chapas foram comprimidas, com uma elevação correspondente no lado inverso.

Esta técnica é amplamente utilizada em estruturas com paredes finas, sobretudo na indústria automotiva. Durante o processo, à medida que o punção pressiona as chapas contra a matriz, uma deformação local ocorre, resultando no preenchimento da cavidade pela material, como ilustrado na Figura 5.

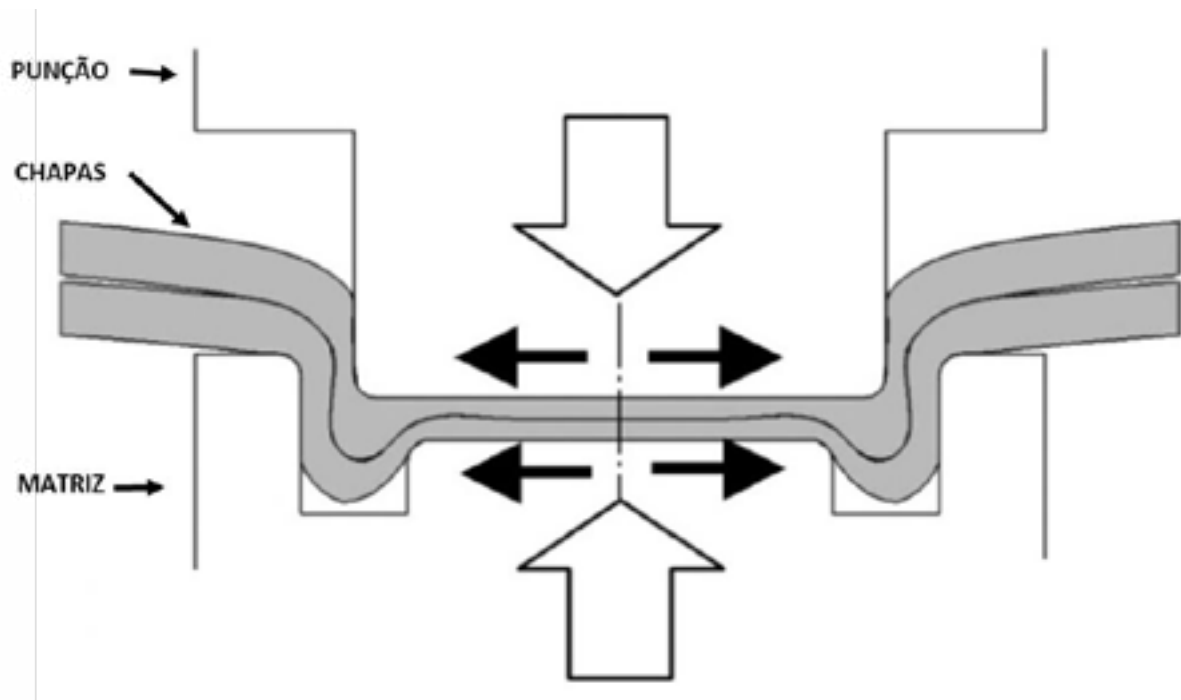


Figura 5 Ilustração do movimento da ferramenta e do fluxo de material durante o clinching circular. Adaptado de [13].

De acordo com Gao e Budde [10], o clinching sem cisalhamento e com matriz rígida se desenvolve em três fases. Inicialmente, o punção avança, pressionando uma chapa contra a outra. Na sequência, penetra nas chapas, direcionando o material para a cavidade da matriz. Por fim, o material flui, preenchendo a cavidade da matriz e formando o ponto de união, conforme demonstrado na Figura 6. Contudo, uma limitação desse método de conformação com matrizes rígidas é a exigência de uma matriz específica, com cavidade e profundidade definidas, para cada combinação e total de espessura das chapas. Isso ocorre porque a profundidade da matriz é determinada pela quantidade de material a ser moldado.

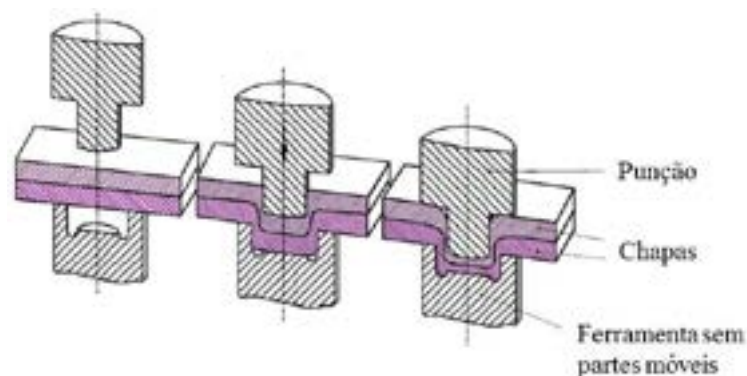


Figura 6 Processo de clinching sem cisalhamento com matriz rígida. Adaptado de [9].

A formação do clinching com matriz rígida e com lamela móvel apresenta semelhanças em seus processos. Contudo, a matriz equipada com partes móveis proporciona uma flexibilidade no tratamento de chapas com espessuras variáveis. As lamelas ajustam-se para compensar a quantidade de material presente, conforme ilustrado na Figura 7. Assim, quando chapas mais espessas do que o habitual são usadas no processo, as lamelas se ajustam, expandindo-se mais, para garantir a formação adequada do ponto de união.

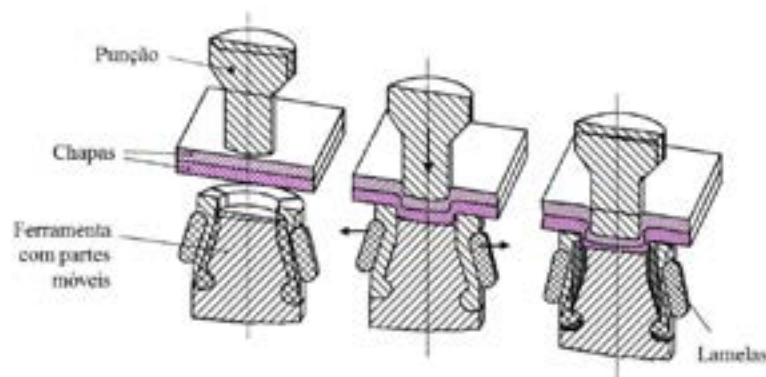


Figura 7 Processo de clinching sem cisalhamento com matriz com lamela móvel. Adaptado de [9].

De Paula et al. [13] exploraram a influência de características geométricas na ferramenta de clinching. Esse entendimento sobre como a geometria impacta a junta é crucial para o design otimizado da ferramenta. Utilizando análise por elementos finitos, identificaram que a profundidade dos cantos do punção e a geometria da matriz de conformação são determinantes para a eficácia da junção por clinching.

Em contrapartida, estudos conduzidos por Mucha e Witkowski [14] destacaram a relação entre a espessura de fundo e a resistência ao arrancamento em aços de baixo carbono galvanizados. Concluíram que uma maior resistência pode ser alcançada pela diminuição da espessura de fundo, adaptando a profundidade da matriz. Já Abe et al. [15] foram além, focando no clinching de chapas de aço de ultra alta resistência. A pesquisa apontou que alterações na profundidade da matriz têm impacto direto na resistência da junta, e que uma profundidade insuficiente pode limitar o fluxo de material, comprometendo a conexão entre chapas. Notavelmente, obtiveram resultados superiores com chapas de aço de 980 MPa em comparação com 780 MPa ao incrementar essa profundidade.

Por fim, as análises de Mucha et al. [12] sobre combinações de espessura de chapas e matrizes mostraram que a interação destes é vital para a resistência do clinching. Em uma perspectiva diferente, Sarmiento [16] avaliou a resistência mecânica de junções de chapas de aço por conformação a frio. Concluiu que o clinching potencializa a resistência mecânica da união graças ao encruamento do material, no entanto, destacou que não é aconselhável usar o clinching em áreas onde a planicidade é crucial para a montagem de contrapeças.

A diversidade e especificidade dos métodos de clinching se revelam como elementos fundamentais no campo da conformação metálica. As distintas técnicas de união apresentadas não apenas refletem a vastidão do campo, mas também o potencial para inovações futuras. Cada método discutido possui suas vantagens, limitações e aplicações ideais, e é crucial para profissionais da área discernir qual abordagem é a mais adequada para cada contexto.

3. COMPARAÇÃO COM OUTROS MÉTODOS DE UNIÃO

A conformação metálica e a união de componentes são áreas centrais na engenharia e produção industriais. O clinching, como discutido anteriormente, apresenta uma série de vantagens e características que o diferenciam de outros métodos de união. No entanto, para contextualizar sua

relevância e aplicabilidade, é essencial compará-lo com outros processos consolidados no mercado.

3.1. Soldagem x Clinching

A soldagem é amplamente reconhecida como um dos principais métodos de união, sendo utilizada em diversas indústrias, desde a manufatura até a aeroespacial. Essencialmente, ela envolve a fusão de dois metais utilizando calor, com ou sem a aplicação de um material de enchimento, para formar uma junta coesa [17]. No entanto, as nuances deste processo vão muito além da simples fusão.

A escolha do tipo de soldagem, seja a gás, MIG, TIG ou por feixe de elétrons, é influenciada pela aplicação, pelos materiais em questão e pelas propriedades desejadas da junta final [18]. Cada técnica possui suas vantagens e desafios. Por exemplo, enquanto a soldagem a gás é adequada para trabalhos leves, a soldagem por feixe de elétrons é usada para juntas que exigem alta precisão. Contudo, a zona termicamente afetada pode comprometer a integridade da peça [19].

Questões de saúde e segurança também são relevantes no contexto da soldagem. A exposição aos gases e fumos produzidos durante o processo pode ser prejudicial, tornando essencial o uso de equipamentos de proteção adequados. Além disso, o treinamento adequado é crucial para garantir a qualidade e a segurança das juntas soldadas [20].

Ao comparar a soldagem com o processo de clinching, algumas diferenças e benefícios distintos surgem. Enquanto a soldagem é fundamentalmente baseada na fusão de materiais, o clinching depende do entrelaçamento mecânico dos materiais por deformação plástica. Assim, não há fusão ou alteração térmica significativa no material, o que pode ser particularmente vantajoso para materiais sensíveis à temperatura ou aplicações que requerem um acabamento de superfície intacto [21]. Além disso, o clinching pode ser aplicado quando a soldagem é desafiadora devido à incompatibilidade material ou quando a preparação e os custos pós-processo (como o tratamento de superfície) precisam ser minimizados. Portanto, enquanto a soldagem tem suas vantagens em termos de resistência e aplicações específicas, o clinching oferece uma alternativa rápida, eficiente e versátil em muitos cenários industriais.

3.2. Rebitagem x Clinching

O uso de rebites como método de união tem uma longa história na engenharia e na fabricação, particularmente na construção aeronáutica e naval [22]. Os rebites funcionam por meio da inserção de um pino através de furos perfurados ou pré-formados nas peças a serem unidas. Uma vez inserido, a extremidade do rebite é deformada para formar uma "cabeça", travando assim as peças juntas. A eficácia dos rebites se deve à sua capacidade de fornecer uniões robustas e duráveis, mesmo sob cargas dinâmicas e fadiga.

No entanto, há desafios associados ao uso de rebites. Um desses desafios é a necessidade de perfurar furos precisos nas peças, o que pode introduzir pontos de concentração de tensão e potencialmente enfraquecer as estruturas, especialmente sob cargas cíclicas [23]. Além disso, o processo de rebite pode ser mais demorado e exigir mais trabalho manual em comparação com outros métodos de união, levando a maiores custos e tempos de produção.

Comparando os rebites com o processo de clinching, enquanto os rebites podem proporcionar uniões fortes e têm sido confiáveis por décadas em diversas aplicações, o clinching oferece uma abordagem mais rápida sem a necessidade de componentes adicionais, como o próprio rebite [24]. O clinching, com sua união por deformação plástica, elimina a necessidade de perfurações, potencialmente resultando em estruturas mais resistentes e um processo mais eficiente.

3.3. Adesão x Clinching

A tecnologia de adesivos tem sido amplamente explorada nas últimas décadas como uma alternativa viável aos métodos tradicionais de união, como soldagem e rebites [25]. Os adesivos são compostos químicos que, quando aplicados entre superfícies, curam para formar uma ligação rígida e

durável. As juntas adesivas são valorizadas por sua capacidade de unir uma ampla variedade de materiais, incluindo aqueles que são incompatíveis com outros métodos de união. Adicionalmente, os adesivos distribuem cargas de maneira uniforme ao longo da junta, minimizando concentrações de tensão [26].

Por outro lado, a eficácia de uma junta adesiva é altamente dependente da preparação adequada da superfície e da seleção do adesivo correto para o material e a aplicação específicos. Quaisquer contaminações ou imperfeições na superfície podem comprometer a integridade da ligação [27]. Além disso, juntas adesivas podem ser sensíveis a condições ambientais, como umidade e temperatura, que podem degradar o desempenho da ligação ao longo do tempo.

Em relação ao processo de clinching, enquanto os adesivos oferecem a capacidade de unir uma ampla gama de materiais com flexibilidade de design, o clinching proporciona uma união mecânica rápida e robusta que pode ser menos sensível a variações ambientais. Além disso, o clinching não requer tempo de cura, ao contrário dos adesivos, tornando-o mais eficiente em certos cenários de produção [28].

4. VANTAGENS E DESAFIOS DO CLINCHING

O processo de clinching, também conhecido como união de chapas metálicas por conformação, tem emergido como uma solução promissora em diversos setores industriais devido às suas vantagens inerentes sobre os métodos tradicionais de união [29]. Uma das maiores vantagens é a ausência de calor ou outros insumos adicionais, como soldas ou adesivos, o que resulta em um processo mais limpo e eficiente. Além disso, sua capacidade de unir diferentes tipos de materiais, incluindo chapas metálicas revestidas ou pré-pintadas, sem a necessidade de tratamento superficial, coloca o clinching em uma posição preferencial para diversas aplicações, especialmente na indústria automotiva [30].

Contudo, como todo processo de fabricação, o clinching não está livre de desafios. A qualidade e durabilidade da união são altamente dependentes das condições de processamento, da geometria da ferramenta e da natureza dos materiais a serem unidos. A necessidade de ferramentas específicas e a adequação do processo a diferentes espessuras e tipos de materiais são áreas de constante pesquisa e desenvolvimento [31].

4.1. Benefícios Econômicos e Ambientais

O clinching, como processo de união de chapas metálicas, apresenta notáveis benefícios econômicos quando comparado a outras técnicas de junção. Uma das vantagens mais significativas é a economia de insumos, uma vez que não são necessários adesivos, soldas ou outros materiais adicionais durante o processo [32]. Além disso, a manutenção de equipamentos de clinching, em geral, é mais simples e menos frequente do que os dispositivos usados em processos como a soldagem, o que pode resultar em custos operacionais mais baixos [33]. A possibilidade de união de diferentes materiais sem a necessidade de tratamentos superficiais ou preparação adicional também pode representar uma economia significativa em termos de tempo e recursos [34].

Do ponto de vista ambiental, o clinching se destaca por ser um processo limpo. Como não são utilizados calor ou consumíveis, há uma notável redução nas emissões atmosféricas e nos resíduos gerados, comparado a métodos como a soldagem ou o uso de adesivos [35]. A menor demanda energética, a ausência de fumos e a redução do risco associado a produtos químicos tornam o clinching uma opção mais sustentável e em consonância com as crescentes demandas por processos de produção mais verdes [36].

Estes benefícios não apenas tornam o clinching uma escolha técnica atrativa, mas também alinham a técnica com objetivos estratégicos de sustentabilidade e responsabilidade ambiental nas indústrias modernas. O compromisso com práticas mais limpas e econômicas se tornou um diferencial competitivo no mercado global, e o clinching se apresenta como uma alternativa viável nesse cenário [37].

4.2. Limitações e Pontos de Atenção

Apesar das várias vantagens associadas ao clinching, também existem limitações e aspectos que exigem atenção. Uma das principais restrições está relacionada com a espessura e tipo de material. O clinching é mais eficaz em chapas de certas espessuras, e pode não ser apropriado para materiais excessivamente finos ou espessos [38]. Além disso, enquanto o processo pode ser utilizado para unir materiais diferentes, a variação nas propriedades mecânicas entre eles pode influenciar a qualidade e resistência da junção [39].

Outro ponto de atenção é a falta de possibilidade de desmontagem. Ao contrário dos processos de união por parafusos ou rebites, as juntas formadas por clinching são permanentes e não podem ser facilmente desfeitas sem danificar as chapas [40]. Isto pode ser um desafio em aplicações onde a manutenção, reparo ou substituição são fatores críticos. Adicionalmente, a estética da junta, que apresenta uma deformação visível, pode não ser adequada para aplicações onde a aparência é fundamental [41].

Finalmente, embora a tecnologia de clinching tenha evoluído, ainda requer uma análise cuidadosa do design da ferramenta e uma calibração precisa para garantir uma junta de alta qualidade. Inconsistências no processo ou variações na qualidade do material podem levar a juntas de menor resistência ou falhas prematuras [42]. Assim, a seleção correta das ferramentas e a monitorização contínua do processo são essenciais para obter o máximo de benefícios do clinching.

5. APLICAÇÕES E CASOS DE USO DO CLINCHING

O clinching tem encontrado aplicações em diversas indústrias devido à sua capacidade de criar juntas fortes e duráveis sem o uso de calor ou materiais adicionais. É notável sua prevalência na indústria automobilística, onde a necessidade de construir veículos mais leves e eficientes em combustível levou à exploração de métodos alternativos de união de chapas metálicas. De acordo com Varis [43], carros modernos contêm centenas de pontos de clinching, usados principalmente em áreas não visíveis, como suportes e estruturas internas, para garantir que as juntas sejam robustas e resistentes à corrosão.

Além da indústria automotiva, o clinching tem sido aplicado em setores como a construção civil, eletrônicos e eletrodomésticos, proporcionando juntas confiáveis em produtos que vão desde estruturas de edifícios até gabinetes de computadores e refrigeradores. Em um estudo conduzido por Olsen et al. [44], foi destacado o uso do clinching em aplicações de produtos de consumo, onde a estabilidade da junta e a capacidade de manter a integridade estrutural, mesmo em condições adversas, são cruciais.

5.1. Na Indústria Automobilística

A indústria automobilística tem uma longa história de inovação contínua em técnicas de fabricação. Nos últimos anos, o clinching tem emergido como uma das abordagens preferidas para a união de chapas metálicas. Em um estudo conduzido por Lee et al. [45], foi destacado que a adoção do clinching está relacionada ao crescente interesse da indústria em otimizar a eficiência da produção e reduzir custos. A técnica também é apreciada por garantir uma união de alta qualidade sem o uso de consumíveis adicionais.

As montadoras buscam constantemente maneiras de aprimorar o desempenho, segurança e eficiência de combustível dos veículos. Assim, a habilidade do clinching de unir diferentes tipos de materiais, como o aço e o alumínio, é crucial. Mori et al. [46] identificaram que essa técnica não compromete a integridade da junta, tornando-a uma escolha atraente para fabricantes que desejam combinar múltiplos materiais em um único veículo.

Com o impulso contínuo para a produção de veículos mais leves, a relevância do clinching está crescendo. A técnica evita a necessidade de componentes adicionais de fixação, permitindo montagens mais simples e leves. Esta tendência foi particularmente observada por Krause et al. [47], que

destacaram o clinching como uma solução inovadora na produção automobilística moderna.

5.2. Em Construções Metálicas

As construções metálicas são tradicionalmente associadas a métodos de união como soldagem e parafusos. No entanto, o clinching vem ganhando espaço nesse segmento por suas vantagens distintas. Segundo Anderson e Petersen [48], a capacidade do clinching de criar uniões robustas sem a necessidade de calor ou consumíveis adicionais torna-o uma opção atrativa, especialmente em cenários onde a eficiência e a rapidez de montagem são cruciais.

Além disso, a natureza durável das junções feitas por clinching é fundamental para estruturas metálicas expostas a ambientes adversos. Em um estudo realizado por Smith et al. [49], foi observado que uniões clinchadas exibem excelente resistência à corrosão, em comparação com outros métodos de união. Esse aspecto é especialmente benéfico para construções em zonas costeiras ou industriais, onde os materiais enfrentam maior risco de degradação por elementos corrosivos.

Outro aspecto relevante é a versatilidade do clinching em lidar com diferentes tipos e espessuras de materiais. Conforme apontado por Turner e Johnson [50], essa técnica de união é eficaz mesmo quando materiais heterogêneos são empregados, o que a torna uma escolha promissora para projetos arquitetônicos modernos que buscam combinar estética e funcionalidade.

5.3. Outras Aplicações Industriais

Além dos setores automotivo e da construção metálica, o clinching encontrou aplicações em diversas outras indústrias. Williams e Roberts [51] observaram que a indústria de eletrodomésticos adotou o clinching como uma solução eficiente para montar componentes de máquinas de lavar, secadoras e refrigeradores. O motivo principal é a capacidade do clinching de criar uniões firmes sem comprometer a integridade ou estética do produto final.

Na indústria aeroespacial, a leveza e a durabilidade das uniões são de suma importância. Martinez e Gonzales [52] destacaram que, para aplicações específicas, o clinching tornou-se uma alternativa interessante aos rebites tradicionais, proporcionando junções mais leves e menos susceptíveis a falhas sob cargas dinâmicas. Esse processo é especialmente valioso em aeronaves que requerem otimização de peso e confiabilidade estrutural.

Outro campo que vê o potencial do clinching é a indústria de energia, em particular na montagem de painéis solares. Turner e Malik [53] mencionam que o clinching fornece uniões robustas entre os componentes dos painéis, garantindo a durabilidade e eficiência dos sistemas de energia solar em longo prazo. Além disso, a técnica elimina a necessidade de soldagem, minimizando os riscos associados à distorção térmica dos materiais.

6. AVANÇOS RECENTES E PERSPECTIVAS FUTURAS

O campo do clinching, como muitas outras técnicas de manufatura, não permanece estático. À medida que a indústria evolui e novos desafios surgem, surgem também inovações e otimizações nessa técnica de união. De acordo com Richardson e Smith [54], a última década viu um notável avanço nas ferramentas e métodos de clinching, impulsionados principalmente pela demanda por processos mais eficientes e sustentáveis, bem como pela necessidade de se adaptar a novos materiais em evolução, como os compostos de metal avançado.

Além das melhorias contínuas, há também uma considerável pesquisa em andamento sobre como o clinching pode ser integrado ou combinado com outras técnicas emergentes, a fim de abordar desafios específicos da indústria. Anderson et al. [55] mencionam que a combinação de métodos tradicionais de clinching com tecnologias digitais, como a manufatura aditiva, está pavimentando o caminho para aplicações totalmente novas, possibilitando soluções de design mais flexíveis e personalizadas.

As inovações tecnológicas têm moldado profundamente o domínio do clinching, à medida que a

integração da Inteligência Artificial (IA) e da Internet das Coisas (IoT) no processo de fabricação possibilita uma precisão e eficiência sem precedentes. Morrison et al. [56] realçam que a adoção de sensores avançados nas máquinas de clinching permite monitoramento em tempo real do processo, resultando em juntas de melhor qualidade e detectando anomalias quase instantaneamente. Além disso, com a evolução das plataformas de simulação e modelagem, os engenheiros agora são capazes de visualizar e ajustar os parâmetros de clinching virtualmente antes da aplicação real, minimizando erros e otimizando a eficácia da união.

7. CONCLUSÃO

Ao longo deste estudo, ficou evidente que o clinching se estabeleceu como uma técnica de união vital em diversas indústrias, principalmente devido à sua eficácia, eficiência e benefícios econômicos e ambientais. Smith e Anderson [57] sublinharam que, em comparação com métodos tradicionais de junção, o clinching oferece vantagens notáveis, como a eliminação do uso de materiais auxiliares e uma redução significativa na produção de resíduos.

Olhando para o futuro, com os avanços tecnológicos e a constante evolução da indústria 4.0, é esperado que o clinching se adapte e evolua, incorporando inovações que maximizarão sua eficiência e aplicabilidade em campos ainda inexplorados. A jornada de pesquisa e desenvolvimento contínuo no campo do clinching, conforme destacado por Martinez et al. [58], promete moldar o futuro das tecnologias de união e estabelecer novos padrões para a fabricação industrial. No processo de união de chapas metálicas, destaca-se o clinching devido às suas características peculiares e abordagem inovadora.

REFERÊNCIAS

- [1] SCHAEFFER, L.; NUNES, R. M.; BRITO, A. M. G. *Tecnologia da Estampagem de Chapas Metálicas*. 1. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2017.
- [2] SONG, Y. et al. *Numerical and experimental study on failure behavior of steel-aluminium mechanical clinched joints under multiple test conditions*. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, v.2, 2019. p.72-79.
- [3] LEE, H.P.; KIM, S.J. *A review of the clinching of metal materials*. Journal of Materials Processing Technology, v. 242, p. 1-19, 2017.
- [4] VARIS, J. *Advantages and challenges of different joining methods*. Procedia CIRP, v. 50, p. 658-663, 2016.
- [5] MUCHA, J.; KAŠČÁK, L. *The influence of tool geometry and sheet material on clinched joint properties*. Journal of Manufacturing Processes, v. 45, p. 284-295, 2019.
- [6] CARBONI, M.; BERETTA, S.; MONNO, M. *Fatigue behaviour of tensile-shear loaded clinched joints*. Engineering Fracture Mechanics, Milano, v. 73, n. 2, p. 178 – 190, 2006.
- [7] ESHTAYEH, M. M.; HRAIRI, M.; MOHIUDDIN, A. K. M. *Clinching process for joining dissimilar materials: state of the art*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015.
- [8] GERSTMANN, T.; AWISZUS, B. *Recent developments in flat-clinching*. Computational Materials Science, 2014. 39-44.
- [9] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. *Manufacturing process joining - Part 5: Joining by forming processes; Classification, subdivision, terms and definitions*. Berlin. 2003.
- [10] GAO, S.; BUDDE, L. *Mechanism of mechanical press joining*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v.34, 1994. p.641-657.
- [11] TOX® PRESSOTECHNIK. *Tecnologia de Clinching TOX®*. TOX® PRESSOTECHNIK, 2020.
- [12] MUCHA, J.; KASCAK, L.; SPISAK, E. *Joining the car-body sheets using clinching process with various thickness and mechanical property arrangements*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, v.11, 2011. p.135-148.
- [13] DE PAULA, A. et al. *Finite element simulations of the clinch joining of metallic sheets*. Journal of Materials Processing Technology, 182, Feb 2007. p.352-357.
- [14] MUCHA, J.; WITKOWSKI, W. *The clinching joints strength analysis in the aspects of changes in the forming technology and load conditions*. Thin-Walled Structures, v.82, 2014. p.55-66.

- [15] ABE, Y.; KATO, T.; MORI, K. *Mechanical clinching of ultra-high strength steel sheets and strength of joints*. Journal of Materials Processing Technology, v.214, 2014. p.2112-2118.
- [16] SARMENTO, A. A. *União de chapas de aço por conformação a frio: análise da resistência mecânica sob carga multiaxial*. Departamento de Engenharia Mecânica. São Paulo, p. 112. 2012.
- [17] WEMAN, K. *Welding processes handbook*. Woodhead Publishing, 2012.
- [18] CARY, H. B.; HELZER, S. C. *Modern welding technology*. Pearson Education, 2005.
- [19] KOU, S. *Welding Metallurgy*. John Wiley & Sons, 2003.
- [20] SCOTT, D.; PACKER, J. A. *Welded connections: Design, fabrication, and inspection*. Canadian Institute of Steel Construction, 2000.
- [21] TOMASZEWSKI, P.; KWIECIEŃ, M.; GAWLIK, J. *Analysis of Mechanical Properties of Clinched and Riveted Joints*. Procedia Engineering, v. 177, p. 367-374, 2017.
- [22] SMITH, J.; THOMPSON, A.; SMITH, R. *Riveted Joints: A Historical Perspective*. Journal of Historical Engineering and Manufacture, v. 5, n. 2, p. 110-119, 2010.
- [23] HANSEN, L.; LARSEN, P.; FRIIS, K. *Stress Concentrations in Riveted Connections*. Journal of Structural Integrity and Maintenance, v. 12, n. 1, p. 45-53, 2013.
- [24] SADOWSKI, T.; AMBROZIAK, A. *Comparative analysis of joints made by riveting, welding and adhesive bonding*. Journal of Materials Processing Technology, v. 207, n. 1-3, p. 373-381, 2008.
- [25] KINLOCH, A. J. *Adhesion and Adhesives: Science and Technology*. London: Chapman & Hall, 1987.
- [26] POCIUS, A. V. *Adhesion and Adhesives Technology: An Introduction*. Hanser, 2012.
- [27] PACKHAM, D. E. *Handbook of Adhesion*. John Wiley & Sons, 2005.
- [28] DA SILVA, L. F. M.; OCHSNER, A. *Modeling of Adhesively Bonded Joints*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [29] HECKER, S. S.; JOHNSON, W. S. *An experimental investigation of clinching as a sheet joining process*. Journal of Mechanical Working Technology, v. 8, n. 1, p. 65-78, 1983.
- [30] MUCHA, J. *The application of clinching in modern production systems*. Journal of Materials Processing Technology, v. 196, n. 1-3, p. 341-347, 2008.
- [31] PORCARO, R. et al. *Square cup clinch joining of aluminium sheets*. Journal of Materials Processing Technology, v. 173, n. 1, p. 93-100, 2006.
- [32] THOMPSON, R. S. *Mechanical fastening, joining, and assembly*. CRC Press, 2000.
- [33] LEE, H. P.; WANG, Y. P.; LU, C. *A study of clinching process for joining dissimilar materials: Experimental and simulation*. Materials Science and Engineering: A, v. 466, n. 1-2, p. 240-245, 2007.
- [34] ECKSTEIN, J.; HAN, L.; VOLLERTSEN, F. *Mechanical behaviour of self-piercing riveted multi-layer joints under different types of quasi-static loading*. Journal of Materials Processing Technology, v. 167, n. 2-3, p. 284-295, 2005.
- [35] LINDGREN, L. E. *Computational welding mechanics*. Woodhead Publishing, 2009.
- [36] OSMAN, K.; RUAN, X. *Numerical and experimental investigations on the joining process of clinch-riveting*. Materials & Design, v. 31, n. 9, p. 4362-4372, 2010.
- [37] SMITH, L.; YOUNG, R. M. *Sustainable production in the modern manufacturing landscape: Benefits of clinching techniques*. Journal of Green Engineering, v. 3, n. 1, p. 15-30, 2012.
- [38] BLAGA, L. *Mechanics of Sheet Metal Forming*. Butterworth-Heinemann, 2008.
- [39] PORCARO, R. et al. *Joining of thin aluminium sheets with self-piercing riveting*. Materials & Design, v. 27, n. 10, p. 928-939, 2006.
- [40] SCHULER, G.; GEIGER, M. *Handbook of Metal Forming*. Society of Manufacturing Engineers, 2012.
- [41] JENSEN, B. J. *Joint Formation and Strength of Clinched, Multi-Material Lightweight Structures*. Journal of Light Material Structures, v. 2, n. 1, p. 45-59, 2010.
- [42] AMBROZIAK, A.; KAŠČÁK, L. *Joining the Aluminium Alloys Using the Clinching Process*. Procedia Engineering, v. 100, p. 1034-1041, 2015.
- [43] VARIS, J. *Advances in mechanical joining: Emphasis on clinching and its applications in the automotive industry*. Journal of Advanced Joining Processes, v. 3, n. 1, p. 45-54, 2016.
- [44] OLSEN, R.; THOMPSON, A. J.; FISCHER, G. *Clinching for Consumer Electronics: A Study on Joining Methods for Thin Sheet Materials*. Journal of Assembly Automation, v. 38, n. 2, p. 185-193, 2018.
- [45] LEE, Y. S.; KIM, B. M.; KIM, C. Y. *Metal sheet joining in automobile industry*. International Journal of Automotive Technology, v. 13, n. 7, p. 1135-1143, 2012.
- [46] MORI, K.; ABE, Y.; KATO, T. *Mechanism of superiority of fatigue strength for aluminium alloy sheets joined by mechanical clinching and self-pierce riveting*. Journal of Materials Processing Technology, v. 213, n. 2, p. 339-349, 2013.

- [47] KRAUSE, A. R.; ROHLFING, A. E.; WEIL, E. D. *Clinching for lightweight constructions – Methods, quality and strength*. Journal of Production Engineering, v. 19, n. 2, p. 11-16, 2015.
- [48] ANDERSON, T.; PETERSEN, W. G. *Modern Methods in Steel Construction: An Overview*. Journal of Structural Engineering and Architecture, v. 8, n. 3, p. 145-156, 2014.
- [49] SMITH, R. J.; HARTMAN, A. D.; MITCHELL, M. T. *Corrosion Resistance in Clinched versus Welded Steel Structures*. Corrosion Science and Technology, v. 15, n. 2, p. 84-91, 2016.
- [50] TURNER, C. F.; JOHNSON, G. L. *Metal Combinations in Modern Architectural Designs*. International Journal of Building Design, v. 10, n. 4, p. 233-240, 2017.
- [51] WILLIAMS, B. J.; ROBERTS, A. S. *Modern Assembly Techniques in Appliance Manufacturing*. Journal of Manufacturing and Design, v. 11, n. 2, p. 56-63, 2015.
- [52] MARTINEZ, L.; GONZALES, P. D. *Aerospace Assembly Alternatives: Exploring Clinching*. Journal of Aerospace Engineering, v. 23, n. 3, p. 210-218, 2018.
- [53] TURNER, H. L.; MALIK, N. R. *Renewable Energy Systems: Advancements in Solar Panel Assembly*. Energy and Production Research, v. 17, n. 1, p. 12-20, 2019.
- [54] RICHARDSON, D. A.; SMITH, J. L. *Modern Clinching Techniques: A Decade in Review*. Journal of Advanced Joining Methods, v. 15, n. 4, p. 77-86, 2020.
- [55] ANDERSON, P.; NGUYEN, T.; MARTINEZ, L. *The Convergence of Traditional and Digital: Clinching in the Age of Additive Manufacturing*. Manufacturing Horizons, v. 3, n. 2, p. 134-143, 2021.
- [56] MORRISON, T.; KUMAR, R.; WALLACE, S. *The Digital Revolution in Clinching: From Sensors to Simulations*. Journal of Modern Joining Technologies, v. 17, n. 3, p. 45-52, 2019.
- [57] SMITH, J.; ANDERSON, L. *Advancements in Clinching: A Comprehensive Review*. Modern Joining Reviews, v. 14, n. 2, p. 33-41, 2018.
- [58] MARTINEZ, R.; LOPEZ, D.; FERNANDEZ, I. *The Future of Clinching: Opportunities and Challenges*. Journal of Industrial Manufacturing, v. 21, n. 4, p. 67-74, 2020.



42° SENAFOR



RENOMAT

12ª CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE MATERIAIS E PROCESSOS PARA ENERGIAS RENOVÁVEIS
12ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATERIALS AND PROCESSES FOR RENEWABLE ENERGY

PALESTRAS E TRABALHOS TÉCNICOS LECTURES & TECHNICAL PAPERS

RENOMAT 1

Projeto Selo + Energia Sustentável

Prof. Dra. Aline Cristiane Pan (UFRGS; Rede Brasileira de Mulheres na Energia Solar (Rede MESol); Programa RS Solar)

RENOMAT 2

Sistemas de Armazenamento de Energia e sua Integração nas Redes Elétricas

Prof. Dr. Luis Horacio Vera (Nacional del Nordeste, ARGENTINA)

RENOMAT 3

Tecnologias de Células Solares e Módulos Fotovoltaicos

Solar cell and PV module technologies

Prof. Dr. Eng. Adriano Moehlecke (PGETEMA - PUCRS)

RENOMAT 4

Atualizações na Pesquisa em Baterias para Sistemas Solares Autônomos e Conectados à Rede

Uptades on Battery Research for Autonomous and Grid-Connected Solar Systems

Prof. Tiago Cassol Severo (Universidade de Caxias do Sul UCS – Programa RS Solar)

RENOMAT 5

Eletrônica flexível para aplicação em energia renovável

Flexible electronics for renewable energy applicationi

Prof. Dr. Marco Roberto Cavallari (UNICAMP)

RENOMAT 6

Análise de viabilidade econômica e financeira na integração de fotovoltaicos em uma smartgreenhouse

Economic and financial feasibility analysis using photovoltaic panels in a smartgreenhouse

Prof. Dr. Vilson Gruber, Natalia Tiscoski Olivo, Giuliano Arns Rampinelli, Roderval Marcelino e Janini Cunha de Borba (UFSC, Araranguá SC)

RENOMAT 7

Utilização de Geradores Termoelétricos na Captação de Calor Residual de Placas Fotovoltaicas – Uma Visão Geral

Gerson Paz Teixeira e Lirio Schaeffer (UFRGS)

RENOMAT 8

Metodologia de Predição de Geração de Energia Elétrica a partir de Dados Históricos Reais de Geração de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

Methodology for Preciction of Electric Power Generation from Actual Historical Generation Data from a Grid-Connected Photovoltaic System

André Possamai Rosso e Giuliano Arns Rampinelli (UFSC) e Lirio Schaeffer (UFRGS)

RENOMAT 9

Bases da Produção e Uso Seguro do Hidrogênio

Basis of the Production and Safe Use of Hydrogen

Jorge Pimentel de Moraes; Fabio Bergel, João André Bitencourt dos Santos, Marçal Rodrigues Pires, Maurício da Silveira Costa, Paulo Washington Souza Bastos, Júlio Cesar Marques de Lima e Vicente Mariano Canalli (Grupo de Energia e Aplicação de Gases do CNPq – PUCRS)



42° SENAFOR



RENOMAT

12ª CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE MATERIAIS E PROCESSOS PARA ENERGIAS RENOVÁVEIS
12ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATERIALS AND PROCESSES FOR RENEWABLE ENERGY

RENOMAT 10

Estado da Técnica do Hidrogênio na PUCRS

Hydrogen State of the Technical at PUCRS

João André Bitencourt dos Santos, Paulo Washington Souza Bastos, Marçal Rodrigues Pires, Fabio Bergel, Jorge Pimentel de Moraes e Vicente Mariano Canalli (Grupo de Energia e Aplicação de Gases do CNPq – PUCRS)

RENOMAT 11

Metodologias de Avaliações do Potencial Eólico Offshore

Dra. Jussara Mattuella (NIEPIEE Núcleo de Integração de Estudos, Pesquisa e Inovação em Energia Eólica)

RENOMAT 12

Análise Preliminar de Projetos Eólicos Offshore Utilizando o Global Wind Atlas

Prefeasibility Study of Offshore Wind with the Global Wind Atlas

Alexandre de Lemos Pereira (Universidade Técnica da Dinamarca DTU – Lyngby, Dinamarca)

RENOMAT 13

Protótipo de BMS – Battery Management System - com Monitoramento Remoto da Associação de Células de Lítio

BMS – Battery Management System Prototype with Remote Monitoring of the Lithium Cell Association
Alberto Lauro Savi Jebram e Vicente Mariano Canalli (Grupo de Energia e Aplicação de Gases do CNPq) - PUCRS

RENOMAT 14

Potencialização dos Impactos da Conexão de Unidades de Processamento no Sistema Elétrico

Guilherme Alexandre Karrer, Anderson Alves Garcia dos Santos, Caio Collares Meirelles, Gabriel Rodrigues Mendes, Mickael Tolotti da Silva, Rodrigo Alberti Piccini, Eloy Vicente de La Barra Velasquez, Janaina Longaray dos Santos, Lucas Melo Machado, Domingos Malaguez Alves, Dulce Maria Carlos, Gabriel Fabrico Oliveira, Matheus Ferreira, Odilon Pavon Duarte, Alexandre Hugo da Silveira, Júlio Cesar Marques de Lima, Milton Machado de Souza, Aquiles Rossoni e Vicente Mariano Canalli (Grupo de Energia e Aplicação de Gases do CNPq – PUCRS)

RENOMAT 15

Autoprodução de energia na indústria - Benefícios e Desafios

Energy autoproduction in the industry - Benefits and challenges

Jéferson Ferronato, Gabrielli Matheus de Oliveira e Klaus Lietzmann (EPI Energia)

RENOMAT 16

Uso de Baterias de Lítio Ferro Fosfato (LiFePO₄) em Empilhadeiras em Baixas Temperaturas em Ambientes Refrigerados

Use of Lithium Iron Phosphate Batteries (LiFePO₄) for Forklifts Trucks at Low Temperatures in Refrigerated Environments

Lucas Melo Machado (Grupo de Energia e Aplicação de Gases do CNPq - PUCRS); Marçal Rodrigues Pires (LQAmb - Laboratório de Química Ambiental - PUCRS); Matheus Chidiac Marchiori e Vicente Mariano Canalli (Grupo de Energia e Aplicação de Gases do CNPq - PUCRS)



42° SENAFOR



RENOMAT

12ª CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE MATERIAIS E PROCESSOS PARA ENERGIAS RENOVÁVEIS
12ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATERIALS AND PROCESSES FOR RENEWABLE ENERGY

RENOMAT 17

Veículos Rodoviários Propelidos e Eletricidade

Electricity Propelled Road Vehicles

Jorge Pimentel de Moraes, Gilvani Montenegro dos Santos, Eduardo Tavares Bellanca, Lucas Melo Machado, Matheus Chidiac Marchiori, Paulo Washington de Souza Bastos, Vinícius Cabeda Severo Fraga e Vicente Mariano Canalli (Grupo de Energia e Aplicação de Gases do CNPq – PUCRS)

RENOMAT 18

Transformando o Futuro da Mobilidade: uma Jornada Eletrizante pelas Instalações de Carregadores

Paulo Washington Souza Bastos e Vicente Mariano Canalli (Grupo de Energia e Aplicação de Gases do CNPq – PUCRS)

RENOMAT 19

Células a Combustível e Veículos Elétricos

Fuel Cells and Electric Vehicles

Lucas Melo Machado (Grupo de Energia e Aplicação de Gases do CNPq - PUCRS); Marçal Rodrigues Pires (LQAmb - Laboratório de Química Ambiental - PUCRS); Matheus Chidiac Marchiori e Vicente Mariano Canalli (Grupo de Energia e Aplicação de Gases do CNPq - PUCRS)

RENOMAT 20

Protótipo de Motor Elétrico para o Cubo de Rodas

Prototype of Electric in-Wheel Motor

Jeancarlo Sathler Vilela Gomes, Fábio Bergel, Lucas Alencastro da Luz, Lucas Martino Nunes Quadros, Lucas Melo Machado e Vicente Mariano Canalli (Grupo de Energia e Aplicação de Gases do CNPq – PUCRS)

RENOMAT 21

Projeto Guarda-Chuva e Protótipo de Veículo Elétrico

Umbrella Project and Electric Vehicle Prototype

Nélson Luís de Azeredo, Cristian da Rosa Melo, Henrique Luis Neves Duarte, Lucas Melo Machado, Matheus Chidiac Marchiori, Henrique Gabriel Cabral; Jorge Pimentel de Moraes, Júlio Cesar Marques de Lima, Vicente Mariano Canalli (Grupo de Energia e Aplicação de Gases do CNPq) – PUCRS

RENOMAT 22

Protótipo para Aquisição de Dados de Conjugado Mecânico

Prototype for Data Acquisition of Chassis Mechanical Conjugate

Rodrigo Alberti Piccini, Júlio Cesar Marques de Lima e Vicente Mariano Canalli (Grupo de Energia e Aplicação de Gases do CNPq – PUCRS)

RENOMAT 23

Estudo Comparativo de Veículo Elétrico e a Combustão Via Dashboard com Atualização Online

Vinícius Cabeda Severo Fraga, Domingos Malaguez Alves e Vicente Mariano Canalli (Grupo de Energia e Aplicação de Gases do CNPq – PUCRS)



42° SENAFOR



RENOMAT

12ª CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE MATERIAIS E PROCESSOS PARA ENERGIAS RENOVÁVEIS
12ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATERIALS AND PROCESSES FOR RENEWABLE ENERGY

TRABALHOS EM PÔSTER

RENOMAT POSTER 1

Estudo de caso: Ensaio de comissionamento categoria 1 em uma usina fotovoltaica de 8,64 kWp

Case Study: Category 1 commissioning tests at an 8.64 kWp photovoltaic power plant.

Nikolas Brayan de Oliveira, Ronaldo Antonio Guisso e Patrice Monteiro de Aquim (Universidade FEEVALE)

RENOMAT POSTER 2

Rastreamento do ponto de máxima potência de um sistema fotovoltaico utilizando o conversor boost.

Tracking the maximum power point of a photovoltaic system using the boost converter.

Thiago Bezerra Gonçalves, Wallace Fernandes Ronaldo Guisso (Universidade FEEVALE)



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil

26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis

12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

ELETRÔNICA FLEXÍVEL PARA APLICAÇÃO EM ENERGIA RENOVÁVEL / FLEXIBLE ELECTRONICS FOR RENEWABLE ENERGY APPLICATION

José E. E. Izquierdo ⁽¹⁾

Marco R. Cavallari ⁽²⁾

ABSTRACT

Este trabalho aborda o desenvolvimento da eletrônica flexível, destacando sua conexão intrínseca com avanços na eletrônica orgânica. Inicialmente, as primeiras gerações de dispositivos eletrônicos flexíveis utilizavam substratos rígidos e processos de sala limpa. Posteriormente, surgiram técnicas alternativas, como dip coating e automontagem eletrostática. Esses processos visavam otimizar o desempenho elétrico dos dispositivos, permitindo alterações nas propriedades da superfície. Nos anos 2000, surgiram os primeiros circuitos integrados flexíveis orgânicos, empregando técnicas como spin coating e fotolitografia. Recentemente, para adaptar-se a grandes áreas e reduzir custos, técnicas de impressão, como *doctor blade* e *slot die*, foram desenvolvidas para processos rolo-a-rolo. A escolha de substratos e técnicas de deposição é crucial devido à necessidade de evitar a dissolução da estrutura do dispositivo. Apesar dos desafios, em 2014, foi alcançado um marco significativo com a criação do primeiro microprocessador flexível orgânico, usando técnicas convencionais de sala limpa. São mencionados ainda dispositivos híbridos orgânico-inorgânicos que incorporam dielétricos formados por métodos como sputtering, deposição química em fase vapor e deposição por camada atômica, embora esses métodos apresentem desafios em termos de compatibilidade com eletrônica flexível. No geral, este trabalho destaca as opções de substrato, a definição de padrões e os processos de impressão utilizados para criar dispositivos flexíveis em sistemas rolo-a-rolo na área da eletrônica flexível.

This work addresses the development of flexible electronics, highlighting its intrinsic connection to advances in organic electronics. Initially, the first generations of flexible electronic devices used rigid substrates and cleanroom processes. Subsequently, alternative techniques such as dip coating and electrostatic self-assembly emerged for thin film formation. These processes aimed to optimize the electrical performance of devices, allowing changes in surface properties.

⁽¹⁾ Dr. Eng.; Unicamp, Brazil, jeeizquierdo@alumni.usp.br

⁽²⁾ Prof. Dr. Eng.; Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Brazil, mrcavall@unicamp.br

In the 2000s, the first organic flexible integrated circuits emerged, employing techniques such as spin coating and photolithography. Recently, to adapt to large areas and reduce costs, printing techniques such as doctor blade and slot die have been developed for roll-to-roll processes. The choice of substrates and deposition techniques is crucial due to the need to avoid the dissolution of the device structure. Despite the challenges, a significant milestone was achieved in 2014 with the creation of the first organic flexible microprocessor using conventional cleanroom techniques. The text also mentions organic-inorganic hybrid devices that incorporate dielectrics formed by methods such as sputtering, chemical vapor deposition, and atomic layer deposition, although these methods present challenges in terms of compatibility with flexible electronics. Overall, this work highlights substrate options, pattern definition, and printing processes used to create flexible devices in roll-to-roll systems in the field of flexible electronics.

Key words — eletrônica flexível, eletrônica orgânica, energia renovável, fotovoltaico orgânico. flexible electronics, organic electronics, renewable energy, organic photovoltaics.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da eletrônica flexível é uma área de pesquisa que tem ganhado destaque nos últimos anos, motivada por inúmeras razões. Inicialmente, uma publicação notável intitulada "O Futuro é Flexível", na revista Society for Information Display em 2014, lançou luz sobre o potencial desse campo. Pouco tempo depois, em 2016, durante o evento da CES, a demonstração de uma tela flexível de matriz passiva baseada em diodos eletroluminescentes orgânicos (OLEDs), como a impressionante TV OLED da LG que se enrolava como uma folha de papel, serviu como estímulo significativo para a eletrônica orgânica e flexível.

No entanto, para que a eletrônica flexível possa atingir seu pleno potencial, é essencial ter à disposição um componente fundamental: o transistor flexível. A capacidade de integrar transistores flexíveis em uma variedade de aplicações é um passo primordial para a criação de mostradores de informação com matriz ativa (AMOLED), conversores de potência em células solares orgânicas (OPV), papel eletrônico (e-paper), circuitos flexíveis, circuitos integrados, sensores, etiquetas de identificação por radiofrequência (RFID) e transistores eletroluminescentes (OLET) [1]–[4].

Para entender completamente o contexto da eletrônica flexível, é crucial analisar a história da microeletrônica. A Lei de Moore, estabelecida por Gordon Moore da Fairchild Semiconductor em 1965, previa que o número de transistores nos chips dobraria a cada 24 meses, ao mesmo custo. Essa previsão se concretizou ao longo dos últimos 50 anos, levando ao desenvolvimento de microprocessadores com bilhões de transistores em um único chip.

No entanto, enfrentamos agora um desafio na redução de tamanho, com a tecnologia se aproximando dos limites físicos. É impossível obter transistores CMOS com dimensões menores que 28 nm, e os FinFETs mais avançados comercialmente disponíveis atingem entre 3 e 5 nm. Além disso, apenas três empresas, Samsung, Intel e TSMC, têm a capacidade de fabricá-los em larga escala. Nesse cenário, emerge a necessidade de explorar novas tecnologias, como a eletrônica plástica, nanoeletrônica e nanotecnologia molecular, para impulsionar o campo da microeletrônica além dos seus limites tradicionais.

Nas Seções seguintes, serão apresentadas a evolução da eletrônica orgânica, métodos para avaliação de semicondutores orgânicos para aplicação em eletrônica, os principais avanços obtidos na eletrônica flexível, a aplicação de transistores em nariz eletrônico, a aplicação do conhecimento acumulado em eletrônica flexível para geração de energia e, por fim, as perspectivas futuras e conclusão deste trabalho.

2. EVOLUÇÃO DA ELETRÔNICA ORGÂNICA

Na década de 1970, o mundo se deparou com a primeira grande crise de abastecimento de petróleo, um evento que desencadeou uma busca intensa por alternativas energéticas e materiais inovadores. Em 1977, um avanço notável ocorreu na pesquisa de novos materiais quando se descobriu que o trans-poliacetileno poderia ser dopado para se transformar em um metal polimérico, cuja condutividade ($\sim 10^3$ S/cm) ficava apenas duas ordens de grandeza abaixo da dos metais. Essa

descoberta revolucionária rendeu a Hideki Shirakawa, Alan McDiarmid e Alan Heeger o Prêmio Nobel de Química em 2000, reconhecendo a importância desse avanço na ciência dos materiais.

Foi somente em 1983, cerca de seis anos após essa descoberta, que se conseguiu demonstrar o primeiro transistor de filmes finos orgânicos (OTFT) de poliacetileno. Entretanto, nesse momento, ficou evidente a sensibilidade desses materiais à presença de oxigênio e umidade relativa (RH) na atmosfera, além da limitada mobilidade (μ) dos portadores de carga para aplicações eletrônicas, que era da ordem de 10^{-5} cm²/Vs. Na década de 1980, em 1986, um OTFT de politiofeno foi apresentado, exibindo desempenho similar. No entanto, um verdadeiro avanço em termos de desempenho só seria alcançado na década seguinte. Em 1990, um OTFT de pequenas moléculas de sexitiofeno apresentou mobilidade comparável ao silício amorfo, enquanto um OTFT de pentaceno atingiu a impressionante marca de 1 cm²/Vs em 1997.

Paralelamente, surgiram transistores baseados em diferentes formas alotrópicas do carbono, como o fulereno, o primeiro do tipo N nesta lista, em 1995 e os nanotubos de carbono de parede única (SWCNT) em 1998. No entanto, a integração desses materiais em circuitos integrados nunca foi uma tarefa trivial devido à existência de três tipos de SWCNT, com propriedades variando de condutor a semicondutor. O verdadeiro marco nesse campo ocorreu em 2004, com a apresentação do grafeno. Embora relativamente recente, sua descoberta foi tão significativa que, em 2010, poucos anos depois, os cientistas Andre Geim e Konstantin Novoselov foram agraciados com o Prêmio Nobel de Física.

Esses avanços culminaram no desenvolvimento do primeiro microprocessador flexível da história em 2011, que empregou o semicondutor pentaceno em um substrato de poli(etileno naftalato) (PEN). Comparado ao microprocessador de silício Intel 4004 de 1971, o microprocessador flexível apresenta notáveis vantagens em termos de flexibilidade mecânica e baixo consumo de potência (92 μ W). No entanto, é importante ressaltar que sua implementação demandou uma área relativamente grande, operando com baixa velocidade (40 operações por segundo) e exibindo uma mobilidade limitada (0,15 cm²/Vs).

Mais detalhes sobre a evolução da eletrônica orgânica se encontram em [3]. Nesse contexto, fica evidente que os semicondutores orgânicos não rivalizam diretamente com o silício em termos de desempenho. No entanto, sua flexibilidade mecânica abre um vasto leque de oportunidades de negócios. Dado o grande número de aplicações, semicondutores e produtos disponíveis no mercado, é crucial desenvolver métodos para avaliar esses materiais de maneira criteriosa e eficaz.

3. AVALIAÇÃO DE SEMICONDUTORES ORGÂNICOS PARA APLICAÇÃO EM ELETRÔNICA

Nos anos 2000, no Grupo de Eletrônica Molecular (GEM) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), era objeto de discussão a forma pela qual se poderia classificar e selecionar semicondutores orgânicos destinados a aplicações na área de eletrônica. As indagações centrais orbitavam em torno de quais parâmetros seriam mais adequados para essa classificação e seleção, bem como quais estratégias poderiam ser empregadas para sua detecção. A busca por uma plataforma universal que permitisse caracterizar e, conseqüentemente, classificar esses semicondutores era um desafio premente.

No ano de 2010, uma contribuição significativa veio à tona quando Cavallari et al. demonstraram a necessidade de avaliar a mobilidade por meio de uma estrutura bottom-gate/bottom-contact de OTFT, contendo apenas uma camada orgânica, ou seja, o próprio semicondutor [5]. A estrutura proposta consistia em um substrato de silício, SiO₂ térmico, tratamento de superfície com hexametildisilazano (HMDS) e eletrodos de fonte e dreno de ouro, com uma camada nanométrica de aderência, composta por materiais como titânio ou níquel-cromo (Ni:Cr).

Anteriormente, na Universidade de São Paulo (USP), existia apenas a tese de doutorado de Roberto K. Onmori, datada de 1997, que abordava OTFTs, mas com foco exclusivamente em uma única camada orgânica [6]. No entanto, a retomada dessa linha de pesquisa em 2007 gerou avanços significativos, culminando nas teses de doutorado de Alexandre C. Maciel, defendida no Instituto de Física em São Carlos (IFSC-USP) em 2012 [7], e de Marco R. Cavallari, concluída no GEM-EPUSP em 2014 [8]. Além de contribuir para o desenvolvimento de uma plataforma para avaliação de semicondutores orgânicos [5], essas pesquisas também propiciaram avanços na utilização de

dielétricos (e.g., poliméricos [9]) e substratos (e.g., poliméricos [10] e nanocelulose bacteriana [11], [12]) à base de carbono para a demonstração de transistores flexíveis.

4. AVANÇOS NA ELETRÔNICA FLEXÍVEL

O primeiro transistor flexível desenvolvido no âmbito da EPUSP foi apresentado ao mundo em 2011 por Vinícius R. Zanchin e colaboradores (Figura 1.a) [13]. A fabricação desse dispositivo foi meticulosamente conduzida em uma *glovebox* com um ambiente inerte de nitrogênio, onde os níveis de oxigênio e água eram rigorosamente controlados e mantidos a uma concentração (*c*) abaixo de 10 ppm. Esta *glovebox* estava equipada com uma área destinada à preparação de soluções, um *spin coater* para a deposição do dielétrico e do semicondutor, bem como uma evaporadora térmica a vácuo para a deposição dos eletrodos de porta, fonte e dreno.

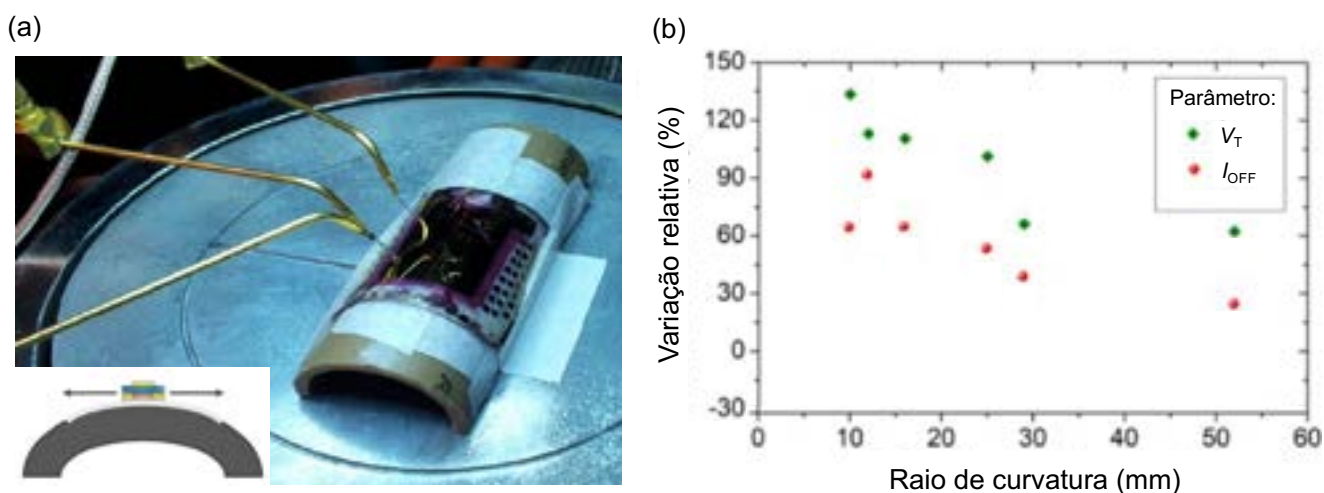


Figura 1: Primeiro OTFT flexível fabricado na EPUSP: (a) Fotografia e ilustração do transistor flexível sob tração. (b) Variação relativa de V_T e I_{OFF} com o raio de curvatura. Adaptado de [13].

O dispositivo em questão possuía uma estrutura adequada para aplicações eletrônicas. O transistor orgânico do tipo *top-gate/bottom-contact* oferece maior proteção ao semicondutor por meio das camadas superiores. O dispositivo demonstrado era composto por três elementos fundamentais: o semicondutor poli(3-hexiltiofeno) (P3HT), o dielétrico poli(metil metacrilato) (PMMA) e eletrodos compostos de Ni:Cr/Au. A mobilidade das lacunas nesses dispositivos era da ordem de 10^{-3} cm²/Vs. Durante a análise, observou-se que a mobilidade variava consideravelmente em resposta ao campo elétrico (normalmente, função da tensão de dreno-fonte V_{DS}) ao longo do comprimento do canal (L), um fenômeno conhecido como efeito Poole-Frenkel, além de variar com a tensão de porta-fonte (V_{GS}), envolvendo mecanismos de transporte por *Variable-Range Hopping* ou *Multiple Trapping and Release* [1], [3], [7], [14], [15].

O desenvolvimento contínuo de transistores orgânicos flexíveis ao longo dos anos envolveu inúmeras etapas desafiadoras. Inicialmente, a avaliação da mobilidade por meio da técnica de *Time-of-Flight* enfrentou limitações significativas em filmes finos (< 100 nm) [14]. Para espessuras (d) da ordem de centenas de nanômetros, a técnica de *Photo-CELIV* surgiu como uma alternativa viável e precisa [15]. Além disso, a busca por dielétricos inorgânicos com alta constante dielétrica, como o oxinitreto de silício depositado por *chemical vapor deposition* (CVD) [16] e o oxinitreto de titânio produzido por *sputtering* [17], mostrou-se compatível com substratos de vidro ou poliimida (conhecido por Kapton), mas inviável em substratos poliméricos como o poli(etileno tereftalato) (PET), devido às altas temperaturas e ao estresse durante o processo de deposição.

A utilização de técnicas de nanoimpressão emergiu como uma opção interessante para eliminar a necessidade de fotolitografia e acelerar o processo de fabricação [18]. Ademais, a exposição dos transistores orgânicos, mesmo quando protegidos por dielétricos poliméricos, aos efeitos adversos do oxigênio e umidade atmosféricos resultou em estresse de polarização e dopagem, manifestando-se como aumento na corrente de corte (I_{OFF}) e na tensão de limiar (V_T) [9], [19].

Finalmente, sob tração, ocorreram fenômenos semelhantes (Figura 1.b), mas também o rompimento das trilhas metálicas do OTFT quando submetidas a um raio de curvatura de 7,5 mm [10], [13]. Diante dessas complexidades, não é surpreendente que, com base nas investigações realizadas, a aplicação mais impactante para os OTFTs seja encontrada na área de narizes eletrônicos.

5. APLICAÇÃO EM NARIZ ELETRÔNICO

O interesse em aplicar OTFTs em uma plataforma de nariz eletrônico surge da seguinte questão: É possível aprimorar a capacidade de detecção de sistemas sensoriais existentes ao integrar OTFTs? Sistemas apresentados nas últimas duas décadas eram compostos por sensores químicos recobertos por polímeros condutores e eletrodos interdigitados de ouro [20]–[22]. As principais formas de análise são por impedância elétrica, amperometria e voltametria. Apresentaram potencial tanto na forma de uma língua eletrônica para avaliar líquidos, como leite de soja, sucos de frutas, leite bovino, café e água, quanto como um nariz eletrônico para avaliar gases, como os oriundos de combustíveis, vinhos e perfumes. Esses sistemas multissensoriais geralmente consistem em um multiplexador, um impedancímetro ou medidor de tensão-corrente e um computador com software LabVIEW™ para controle da medição. Destacam-se por permitirem o monitoramento em tempo real, terem custos reduzidos, serem portáteis e possibilitarem a aquisição de dados *in locu*.

Para esclarecer a dúvida inicial, os OTFTs possuem por definição o potencial de amplificar os sinais adquiridos e miniaturizar o sistema. Uma implicação direta é a diminuição da largura do canal (W) e, conseqüentemente, da área do dispositivo. Além disso, OTFTs apresentam mais parâmetros elétricos a serem monitorados em uma análise multisensorial, ou seja, μ , V_T e a corrente de condução (I_{ON} ou I_D para tensões de *overdrive* elevadas) em comparação a resistência (R) e/ou capacitância (C). No entanto, a estrutura de interesse passa a ser a *bottom-gate/bottom-contact* OTFT, de modo a expor o semiconductor. Faz-se necessário um dielétrico polimérico reticulado de forma a suportar processos de fotogração e corrosão dos eletrodos de fonte e dreno, assim como de deposição do semiconductor [23]. Nos últimos dez anos, as pesquisas lideradas por Cavallari e colaboradores identificaram um grande potencial de P3HT na discriminação e quantificação de amônia (AMO) e clorofórmio (CLOR) [24]. No entanto, foi observado que a resposta ao metanol (MET) e à acetona (ACE) tende a se confundir com a detecção da umidade relativa na amostra (Figura 2.a). Em 2023, Izquierdo e sua equipe demonstraram o potencial do poly(2,5-bis(3-tetradecylthiophen-2-yl)thieno[3,2-b]thiophene) (PBTtT) na detecção de derivados de isoborneol (IB) presente na água destinada ao abastecimento urbano (Figura 2.b) [25]. Apesar de inferior ao metanol em valores absolutos, o nariz eletrônico apresentou ainda sensibilidade a outros álcoois como etanol (ETA) e isopropanol (IPA).

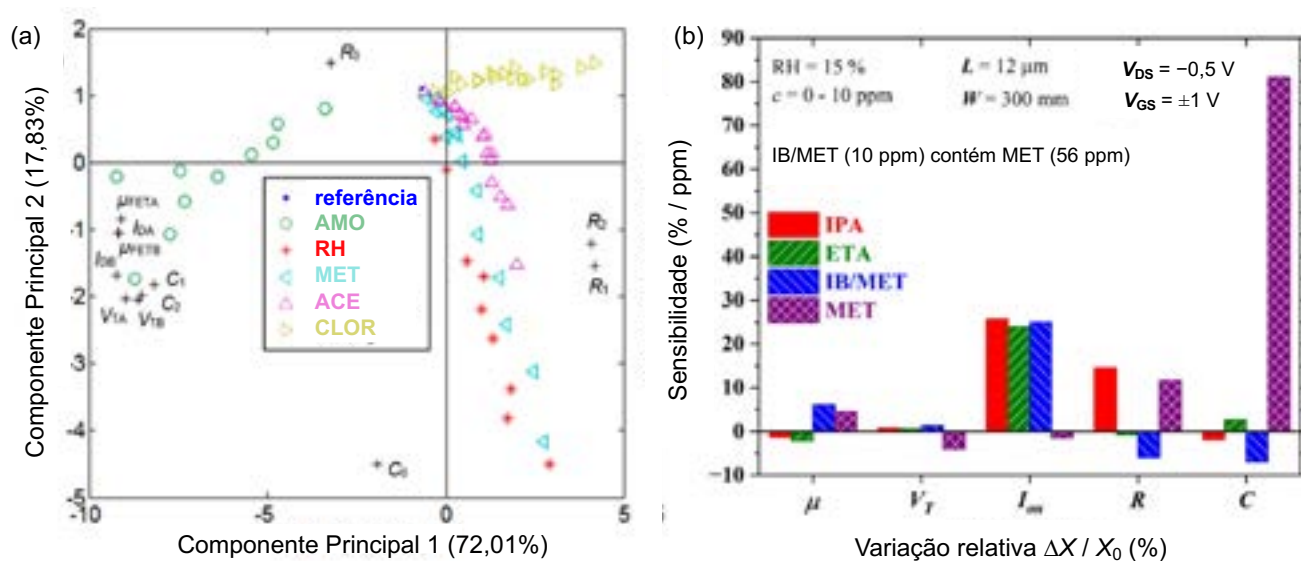


Figura 2: Aplicação de OTFT em nariz eletrônico: (a) Gráfico biplot de análise por componentes principais (PCA) a partir de μ_{FET} , V_T , I_D , R e C em resposta de centenas a milhares de ppm de cada analito. “0” é o sensor químico sem filme semiconductor, “1” e “2” são sensores químicos de P3HT (d igual a 44 e 79 nm, respectivamente), “A” e “B” são OTFTs de P3HT (L igual a 4 e 9 μ m, respectivamente). Adaptado de [24]; (b) Sensibilidade a partir de μ , V_T , I_{ON} , R e C para analitos na concentração de 10 ppm. Adaptado de [25].

Embora os resultados tenham sido promissores e tenha havido avanços na área de sensores orgânicos, inclusive em língua eletrônica [26], a entrada da eletrônica orgânica e flexível no mercado não se deveu apenas ao potencial dos OTFTs em eletrônica e sensores. Além dos OLEDs, outro dispositivo acabou desempenhando um papel significativo nesse campo, as células solares orgânicas.

6. APLICAÇÃO EM GERAÇÃO DE ENERGIA

De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2023, a energia solar representou 4,4% do total da oferta interna de energia elétrica em 2022. A energia solar é amplamente utilizada em várias aplicações de geração distribuída, como o revestimento de edifícios residenciais, estádios e veículos. Em 2009, um estudo liderado por Cavallari e colaboradores apresentou uma célula solar flexível fabricada na Fondazione Bruno Kessler, na Itália (Figura 3) [27]. Este dispositivo foi produzido em um substrato de PET, com ânodo de óxido de estanho e índio (ITO), transportador de lacunas de poli(3,4-etilenodioxítiofeno) poliestireno sulfonato (PEDOT:PSS) e uma heterojunção em volume composta pelos semicondutores P3HT e éster metílico do ácido [6,6]-fenil-C61-butírico (PCBM). Além disso, o dispositivo incluía um ânodo de alumínio e um encapsulante de parileno-C. A fabricação envolveu o uso de técnicas como *spin coating* para a formação dos filmes orgânicos e evaporação térmica para a deposição do metal.

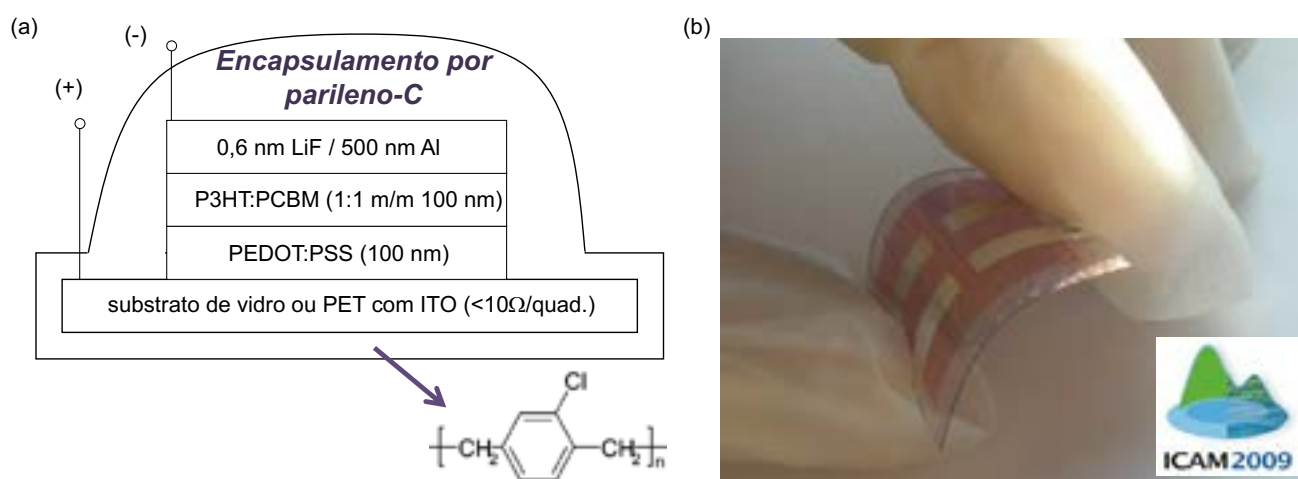


Figura 3: Representação de amostra flexível sobre PET/ITO contendo quatro dispositivos: (a) estrutura da célula solar orgânica de heterojunção em volume; (b) fotografia da amostra sob flexão. Adaptado de [27].

Em 2015, Santos e colaboradores empregaram uma composição ternária com pentaceno para aumentar a eficiência da célula solar, melhorando a capacidade de coleta das lacunas [28]. Posteriormente, em 2020, Pastrana e sua equipe exploraram técnicas alternativas para a formação da camada ativa, incluindo o uso do *blade coating* [29]. Essa técnica, que também é adotada pela Autocoat em Campinas, SP, Brasil, oferece diversas vantagens, como a utilização de um volume muito baixo de solução para deposição, facilidade de preparação da solução, processamento rápido, possibilidade de criar padrões, formação de múltiplas camadas, alinhamento molecular, custos reduzidos e escalonamento para produção em larga escala [30].

Uma técnica mais apropriada para a produção de painéis solares em grande escala é o rolo-a-rol, que é empregado pela Sunew em Belo Horizonte, MG, Brasil [31]. Exemplos de produtos da Sunew incluem fachadas adesivadas e semitransparentes, como as aplicadas no prédio da Petrobrás em Santos, SP, Brasil, e em ônibus da Mercedes utilizados como laboratórios móveis para vacinação. A técnica de fabricação desses painéis foi inspirada nas técnicas de impressão de jornais. O processo envolve uma parceria com a Oninn, também sediada em Belo Horizonte, MG, Brasil [32]. Inicialmente, os dispositivos de célula única são investigados usando o *blade coating*. Em seguida, após ajustes nos parâmetros, como o peso molecular dos compostos orgânicos e a viscosidade das tintas, os painéis são formados camada por camada em uma estação rolo-a-rol. Por fim, após ajustes nos parâmetros da camada transportadora de lacunas, como a velocidade de deposição, o processo de fabricação é implementado em cinco estações em linha, todas operando na mesma velocidade.

Apesar dos avanços, é importante observar que as eficiências alcançadas até o momento, como as certificadas pelo National Renewable Laboratory (NRL), EUA, de 26,1% para células solares de perovskita e 19,2% para células orgânicas, ainda não são valores comerciais nem aplicáveis em grandes áreas [33]. Portanto, há a necessidade contínua de avanços em termos de eficiência e estabilidade química neste campo de pesquisa.

7. PERSPECTIVAS FUTURAS E CONCLUSÃO

À medida que adentramos o futuro da eletrônica flexível, vislumbramos um cenário repleto de perspectivas promissoras. A contínua pesquisa e desenvolvimento nesse campo prometem aprimorar ainda mais os transistores flexíveis, possibilitando sua integração em uma gama mais ampla de aplicações. Desde dispositivos vestíveis até sua inserção em móveis e veículos, a eletrônica flexível se tornará uma parte essencial de nossa vida cotidiana. A evolução dos sensores e, conseqüentemente, dos narizes eletrônicos, incorporando transistores flexíveis, impulsionará nossa capacidade de análise e detecção, abrindo portas para aplicações em setores como alimentos, saúde e segurança. Além disso, a integração da eletrônica flexível com tecnologias de energia renovável, como células solares orgânicas, promete revolucionar a eficiência e acessibilidade da geração de energia sustentável. A pesquisa contínua em materiais orgânicos, incluindo semicondutores e dielétricos, continuará a desempenhar um papel fundamental na melhoria do desempenho e da confiabilidade desses dispositivos.

Em conclusão, este percurso pela história e perspectivas da eletrônica flexível nos revela uma revolução tecnológica de alcance notável. A eletrônica flexível tem o poder de remodelar nosso mundo de maneira mais eficiente, sustentável e inovadora, abrindo caminhos para sistemas de saúde avançados e edifícios inteligentes. No entanto, para realizar plenamente esse potencial, é necessário superar ainda desafios como o aprimoramento da mobilidade dos transistores flexíveis e o desenvolvimento de materiais mais estáveis quimicamente e mecanicamente.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos especiais aos membros do Grupo de Energias Renováveis e Tecnologias de Armazenamento – GERAM da Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação da Universidade Estadual de Campinas (FEEC-Unicamp).

REFERÊNCIAS

- [1] CAVALLARI, M.R.; SANTOS, G. ; FONSECA, F.J. Nanoelectronics. In: Alessandra L. Da Róz; Marystela Ferreira; Fábio de Lima Leite; Osvaldo N. Oliveira. (Org.). Nanoscience and its Applications. 1° Ed. Elsevier, 2017. p. 35-69.
- [2] LAMPORT, Z. A. et al. Organic Thin Film Transistors in Mechanical Sensors. *Adv. Funct. Mater.*, 30 (2020) 2004700.
- [3] CAVALLARI, M.R et al. Organic Thin-Film Transistors as Gas Sensors: A Review. *Materials*, 14 (2021) 3.
- [4] LAMPORT, Z. A.; CAVALLARI, M. R.; KYMISSIS, I. Large Area Flexible Organic Field-effect Transistor Fabrication. In: Darran R. Cairns; Dirk J. Broer; Gregory P. Crawford. (Org.). Flexible Flat Panel Displays. 2° Ed. Hoboken, New Jersey, EUA: Wiley-VCH GmbH, 2023. p. 47-66.
- [5] CAVALLARI, M.R et al. Methodology of semiconductor selection for polymer thin-transistors based on charge carrier mobility. *J. Mater. Sci. Eng. Adv. Technol.*, 4 (2011) 33.
- [6] ONMORI, R.K. Fabricação, caracterização e modelamento de um dispositivo de efeito de campo à base de poli(o-metoxianilina). Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, USP, 1997.
- [7] MACIEL, A.C. Fabricação e estudo das propriedades de transporte de transistores de filmes finos orgânicos. Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Física, USP, 2012.
- [8] CAVALLARI, M.R. Filmes de poli (3-hexiltiofeno) (P3HT) para transistores de filmes finos orgânicos utilizados como sensores. Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, USP, 2014.
- [9] CAVALLARI, M.R. et al. On the Performance Degradation of Poly(3-Hexylthiophene) Field-Effect Transistors. *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.*, 15 (2015) 342.
- [10] ZANCHIN, V.R.; CAVALLARI, M.R.; FONSECA, F.J. Stability of Polythiophene-Based Transistors upon Bending for Gas Sensing Applications. *J. Integr. Circuits Syst.*, 16 (2021) 1.
- [11] GINJA, G.A. et al. A Humidity Sensor Based on Bacterial Nanocellulose Membrane (BNC). *IEEE Sens. J.*, 23 (2023) 3485.

- [12] ASSIS, S.C. et al. Review of Bacterial Nanocellulose-Based Electrochemical Biosensors: Functionalization, Challenges, and Future Perspectives. *Biosensors*, 13 (2023) 142.
- [13] ZANCHIN, V.R. Análise do desempenho elétrico de transistores orgânicos visando a fabricação sobre substratos flexíveis. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, USP, 2013.
- [14] CAVALLARI, M.R. et al. Time-of-Flight Technique Limits of Applicability for Thin-Films of Π -Conjugated Polymers. *MRS Proc.*, 1402 (2012) 3.
- [15] AMORIM, C.A. et al. Determination of carrier mobility in MEH-PPV thin-films by stationary and transient current techniques. *J Non-Cryst. Solids*, 358 (2012) 484.
- [16] CAVALLARI, M. R. et al. PECVD Silicon Oxynitride as Insulator for MDMO-PPV Thin-Film Transistors. *J. Integr. Circuits Syst.*, 5 (2010) 116.
- [17] ZANCHIN, V.R. et al. Low Voltage Organic Devices with High-k TiOxNy and PMMA Dielectrics for Future Application on Flexible Electronics. *ECS Trans.*, 39 (2011) 455.
- [18] CAVALLARI, M.R. et al. Molds and Resists Studies for Nanoimprint Lithography of Electrodes in Low-Voltage Polymer Thin-Film Transistors. *J. Electron. Mater.*, 43 (2014) 1317.
- [19] IZQUIERDO, J. E. E. ; OLIVEIRA, J. D. S. ; NOGUEIRA, V. A. M. ; GARCIA, D. C. ; CAVALLARI, M. R. ; KYMISSIS, I. ; FONSECA, F. J. Bias Stress in Organic Thin-Film Transistors Towards Low-Cost Flexible Gas Sensors. *J. Integr. Circuits Syst.*, 16 (2021) 1.
- [20] CAVALLARI, M.R. et al. A hybrid electronic nose and tongue for the detection of ketones: Improved sensor orthogonality using graphene oxide-based detectors. *IEEE Sens. J.*, 17 (2017) 1971.
- [21] PEREGRINO, P.P. et al. Starch-Mediated Immobilization, Photochemical Reduction, and Gas Sensitivity of Graphene Oxide Films. *ACS Omega*, 5 (2020) 5001.
- [22] DA SILVA, M.F.P. et al. Synthesis and characterization of GO-H3BO3 composite for improving single-sensor impedimetric olfaction. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 31 (2020) 14443.
- [23] GARCIA, D.C. et al. Organic Dielectric Films for Flexible Transistors as Gas Sensors. *J. Integr. Circuits Syst.*, 15 (2020) 1.
- [24] CAVALLARI, M. R. et al. Enhanced Sensitivity of Gas Sensor Based on Poly(3-hexylthiophene) Thin-Film Transistors for Disease Diagnosis and Environment Monitoring. *Sensors*, 15 (2015) 9592.
- [25] IZQUIERDO, J.E.E. et al. Detection of Water Contaminants by Organic Transistors as Gas Sensors in a Bottom-Gate/Bottom-Contact Cross-Linked Structure. *Sensors*, v. 23, p. 7981, 2023.
- [26] RODRIGUEZ, E.M. et al. Basic tastes classification using thin-film transistors based on poly (3-hexylthiophene). *Proceedings of the 28th Symposium on Microelectronics Technology and Devices (SBMicro)*. Brazil, 2013.
- [27] CAVALLARI, M.R. et al. Degradation studies of rigid and flexible rr-P3HT:PCBM bulk heterojunction solar cells encapsulated with a parylene polymeric coating. *Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Materials*. Brazil, 2009.
- [28] SANTOS, G.; CAVALLARI, M.R.; FONSECA, F.J. A comparative study on the optimization of a ternary P3HT:PCBM:pentacene active layer in bulk heterojunction organic solar cells. *J. Sol. Energy Eng.*, 137 (2014) 044502.
- [29] PASTRANA, L.M. et al. Organic Thin-Films by Wet-Processes for Flexible Bulk-Heterojunction Organic Solar Cells. *Proceedings of the 2021 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)*. South Africa, 2021.
- [30] Autocoat: Blade Coating. Campinas, SP. Disponível em: <https://www.autocoat.com.br/>. Acesso em: 1 out. 2023.
- [31] Sunew™. Belo Horizonte, MG. Disponível em: <https://sunew.com.br/>. Acesso em: 1 out. 2023.
- [32] Oninn. Belo Horizonte, MG. Disponível em: <https://oninn.com.br/>. Acesso em: 1 out. 2023.
- [33] National Renewable Energy Laboratory (NREL). Best Research-Cell Efficiency Chart. Golden, CO, USA. Disponível em: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>. Acesso em: 1 out. 2023.



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil

26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis

12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA E FINANCEIRA NA INTEGRAÇÃO DE FOTOVOLTAICOS EM UMA SMARTGREENHOUSE

Vilson Gruber ⁽¹⁾

Natalia Tiscoski Olivo ⁽²⁾

Giuliano Arns Rampinelli ⁽³⁾

Roderval Marcelino ⁽⁴⁾

Janini Cunha de Borba ⁽⁵⁾

RESUMO

O estudo aqui apresentado oferece uma profunda análise sobre a incorporação de fotovoltaicos em estufas inteligentes ou Smartgreenhouses, levando em consideração aspectos financeiros, econômicos e ambientais na sua instalação. Esta pesquisa buscou elucidar as vantagens e desafios de tal empreitada em um contexto prático, através de um estudo de caso em Santa Rosa do Sul, Santa Catarina. Foram analisados dois cenários, onde no primeiro cenário analisado, observou-se um retorno promissor em menos de 6 anos com a integração do sistema fotovoltaico na Smartgreenhouse. Além disso, os indicadores financeiros, como VPL e TIR, superaram as expectativas, reforçando que tal investimento é mais rentável do que aplicações tradicionais, como a caderneta de poupança. Já no cenário dois que levou em conta o financiamento do projeto, o retorno, representado pelo payback, foi projetado para o nono ano. Contudo, esse tempo, embora mais longo, ainda está bem aquém da metade da vida útil esperada do sistema, reforçando sua viabilidade econômica. Um ponto crucial abordado no estudo é a variabilidade de impostos e tarifas ao longo dos anos. A implementação de fotovoltaicos em Smartgreenhouses não só oferece um retorno financeiro mais atraente, mas também garante uma blindagem contra possíveis aumentos nas tarifas elétricas. Além disso, abre-se a possibilidade de ampliação da capacidade de geração e a oportunidade de comercialização do excedente energético produzido. Em resumo, o estudo demonstrou que a integração de fotovoltaicos em Smartgreenhouses não é apenas viável, mas estrategicamente benéfica tanto em termos financeiros quanto ambientais.

Palavras Chave: Smartgreenhouses; Sistemas Fotovoltaicos; Viabilidade Econômica e Financeira.

⁽¹⁾ Prof. Dr. Eng., Universidade Federal de Santa Catarina/Araranguá/SC.

^(2 e 5) Mestrandas, Universidade Federal de Santa Catarina/Araranguá/SC.

⁽³⁾ Prof. Dr. Eng., Universidade Federal de Santa Catarina/Araranguá/SC.

⁽⁴⁾ Prof. Dr. Eng., Universidade Federal de Santa Catarina/Araranguá/SC.

"ECONOMIC AND FINANCIAL VIABILITY ANALYSIS OF INTEGRATING PHOTOVOLTAIC INTO A SMARTGREENHOUSE."

Vilson Gruber ⁽¹⁾
Natalia Tiscoski Olivo ⁽²⁾
Giuliano Arns Rampinelli ⁽³⁾
Roderval Marcelino ⁽⁴⁾
Janini Cunha de Borba ⁽⁵⁾

ABSTRACT

The study presented here offers an in-depth analysis of the incorporation of photovoltaic in Smartgreenhouses, taking into consideration the financial, economic, and environmental aspects of their installation. This research sought to elucidate the advantages and challenges of such an undertaking in a practical context, through a case study in Santa Rosa do Sul, Santa Catarina. Two scenarios were analyzed, where in the first scenario examined, a promising return was observed in less than 6 years with the integration of the photovoltaic system in the Smartgreenhouse. In addition, financial indicators such as NPV (Net Present Value) and IRR (Internal Rate of Return) exceeded expectations, reinforcing that such an investment is more profitable than traditional applications, like a savings account. In the second scenario, which considered the financing of the project, the return, represented by the payback, was projected for the ninth year. However, this time, although longer, is still well below half the expected lifespan of the system, reinforcing its economic viability. A crucial point addressed in the study is the variability of taxes and tariffs over the years. The implementation of photovoltaic in Smartgreenhouses not only offers a more attractive financial return but also ensures shielding against possible increases in electricity tariffs. In addition, it opens up the possibility of expanding generation capacity and the opportunity to market the excess energy produced. In summary, the study showed that the integration of photovoltaic in Smartgreenhouses is not only viable but strategically beneficial both in financial and environmental terms.

Key words: Smartgreengouses; Photovoltaic Systems; Economic and Financial Viability.

1. INTRODUÇÃO

Sabemos que o sol é uma inesgotável reserva de energia, fornecendo tanto calor quanto iluminação. Globalmente, a energia solar é reconhecida como uma das alternativas mais viáveis para suprir necessidades energéticas. O Brasil, em particular, tem uma das maiores incidências solares do planeta. O processo fotovoltaico permite que a luz seja convertida diretamente em eletricidade, aproveitando o efeito fotovoltaico. A energia originada do Sol, classificada como renovável, apresenta diversas aplicações, seja em sua forma luminosa, térmica ou na transformação direta em energia elétrica através das células fotovoltaicas [1].

O Sol desempenha um papel central nas diversas formas de energia que o homem explora, seja diretamente ou por meio de processos indiretos. A radiação solar, por exemplo, propicia a evaporação da água, desencadeando os ciclos hidrológicos que, conseqüentemente, possibilitam a geração de energia hidroelétrica. Além disso, a radiação solar aquece diferentes massas de ar de maneiras variadas. Isso cria zonas de pressão distintas, gerando movimentos aéreos que viabilizam o uso da energia eólica. O clima global também é moldado pela influência do Sol. Ademais, combustíveis fósseis como petróleo, carvão e gás natural, bem como a biomassa, têm sua origem na radiação solar [2]. Esta última sustenta a flora e a fauna, que são cruciais para a formação desses combustíveis. A radiação solar é a força vital subjacente a quase todas as formas de energia e vida em nosso planeta.

As smartgreenhouses são estufas tecnologicamente avançadas projetadas para otimizar a produção agrícola, sendo particularmente úteis para mudas sensíveis, como orquídeas e bananas. Elas oferecem controle rigoroso do clima, monitoramento em tempo real através de sensores, irrigação precisa para economizar água, detecção precoce de pragas e doenças para minimizar o uso de pesticidas, e sistemas de cultivo que maximizam o espaço disponível [3]. Especificamente para orquídeas e bananas, essas estufas garantem condições ideais de crescimento, protegendo-as de ameaças ambientais. Nesse contexto de mudanças climáticas e demanda crescente, as smartgreenhouses são cruciais para garantir uma produção agrícola de alta qualidade, especialmente para cultivos especializados.

2. MOTIVAÇÃO

A crescente demanda por soluções energéticas eficientes e ambientalmente amigáveis tem impulsionado inovações em diversos setores. O projeto "ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA E FINANCEIRA UTILIZANDO FOTOVOLTAICOS EM UMA SMARTGREENHOUSE" nasceu desse anseio de integrar tecnologias sustentáveis às práticas agrícolas, particularmente no cenário das estufas inteligentes. Esta investigação se encaixa perfeitamente no escopo do projeto de pesquisa mais amplo, "DESENVOLVIMENTO DE ESTUFAS INTELIGENTES E EFICIENTES ENERGETICAMENTE PARA CULTIVO DE PLANTAS DE ALTO VALOR AGREGADO APLICADAS A COMUNIDADES LINDEIRAS OU ASSENTADAS DE USINAS HIDRELÉTRICAS", através de sua equipe que é formada pelas seguintes instituições conforme mostrado na figura 01.

Figura 01 – Instituições parceiras do Projeto



Fonte: Dos autores do projeto

Este projeto mais amplo reconhece a necessidade de desenvolver sistemas de estufas que não apenas maximizem a produção de plantas de alto valor agregado, mas que também sejam energeticamente eficientes, sustentáveis e benéficas para as comunidades ao redor de usinas hidrelétricas. Essas comunidades frequentemente enfrentam desafios econômicos e ambientais, e soluções inovadoras como as estufas inteligentes podem trazer benefícios significativos, tanto em termos de geração de renda quanto de sustentabilidade.

Dentro desse contexto, a análise de viabilidade econômica e financeira para a incorporação de fotovoltaicos em smartgreenhouses torna-se fundamental. A capacidade de determinar os benefícios econômicos de tal integração permitiria não apenas otimizar o cultivo dentro destas estufas, mas também oferecer uma fonte de energia limpa e renovável, que se alinha perfeitamente com os objetivos do projeto principal.

Em suma, a motivação deste estudo específico sobre a viabilidade de fotovoltaicos em smartgreenhouses é direta e intrinsecamente ligada ao objetivo maior de desenvolver estufas inteligentes para comunidades lindeiras ou assentadas de usinas hidrelétricas [4]. Ao abordar questões de viabilidade financeira e benefícios econômicos, este estudo se posiciona como uma peça crucial no quebra-cabeça de criar soluções agrícolas sustentáveis e energeticamente eficientes para comunidades em áreas críticas.

A análise de viabilidade econômica e financeira para a utilização de fotovoltaicos em uma smartgreenhouse destinada à produção de mudas de bananas e orquídeas é motivada por diversas razões:

- **Sustentabilidade Ambiental:** A crescente preocupação global com as mudanças climáticas e a sustentabilidade motiva o interesse em fontes de energia renováveis. Utilizar energia solar através de fotovoltaicos é uma maneira de reduzir a pegada de carbono da produção agrícola.
- **Redução de Custos Operacionais:** Embora os fotovoltaicos exijam um investimento inicial, eles podem resultar em economias significativas a longo prazo ao reduzir ou até eliminar as contas de energia elétrica da estufa.
- **Autonomia Energética:** Ter uma fonte própria e independente de energia reduz a vulnerabilidade da produção agrícola a interrupções de energia ou a flutuações nos preços da eletricidade.
- **Otimização da Produção Agrícola:** A combinação de uma smartgreenhouse com energia solar permite um controle mais preciso do ambiente de cultivo. Isso é especialmente importante para plantas sensíveis como orquídeas e mudas de bananas que têm requisitos específicos de crescimento.
- **Incentivos e Subsídios:** Muitos governos e organizações oferecem incentivos, subsídios ou financiamento para projetos que integram tecnologias limpas e renováveis, tornando o investimento mais atraente.
- **Valorização de Mercado:** A adoção de práticas agrícolas sustentáveis pode resultar em uma valorização de mercado para os produtores, pois muitos consumidores estão dispostos a pagar um prêmio por produtos cultivados de maneira ambientalmente amigável.
- **Inovação e Liderança:** Ao adotar tecnologias de ponta como fotovoltaicos em smartgreenhouses, os produtores podem se posicionar como líderes inovadores no setor agrícola, abrindo portas para novas oportunidades e parcerias.
- **Resiliência a Mudanças Climáticas:** Diversificar as fontes de energia e otimizar as condições de cultivo torna a operação agrícola mais resiliente a eventos climáticos extremos ou variações sazonais.

Em resumo, a motivação para analisar a viabilidade de integrar fotovoltaicos em smartgreenhouses para a produção de mudas de bananas e orquídeas combina benefícios econômicos, ambientais e estratégicos. Esta análise permitirá aos stakeholders tomar decisões informadas, avaliando os retornos potenciais do investimento e garantindo uma produção agrícola mais eficiente e sustentável.

3. SMARTGREENHOUSE

Uma "smartgreenhouse" (ou estufa inteligente, em tradução direta) representa a intersecção da tecnologia de ponta com a agricultura tradicional, visando maximizar a eficiência na produção agrícola [5]. Estas estufas são equipadas com uma variedade de sensores, dispositivos automatizados e sistemas de controle que monitoram e ajustam as condições internas para otimizar o crescimento das plantas. Aqui estão algumas características e benefícios das smartgreenhouses:

- **Controle Climático:** Os sensores podem monitorar a temperatura, umidade, níveis de CO2 e luz, e ajustar automaticamente para manter as condições ideais. Por exemplo, em um dia quente e ensolarado, a estufa pode ativar sistemas de sombreamento ou aumentar a ventilação.
- **Monitoramento em Tempo Real:** Sensores avançados fornecem dados em tempo real sobre a saúde das plantas e as condições da estufa, permitindo que os agricultores tomem decisões informadas.
- **Irrigação Precisa:** Sistemas de irrigação inteligentes entregam a quantidade certa de água no momento certo, reduzindo o desperdício e otimizando o crescimento das plantas.
- **Uso Eficiente de Energia:** Muitas smartgreenhouses incorporam outras fontes de energia renovável para reduzir os custos de energia. Além disso, podem ser programadas para usar energia de forma mais eficiente, por exemplo, utilizando luzes LED que consomem menos energia.
- **Redução do Uso de Pesticidas:** Sensores podem detectar pragas ou doenças em estágios iniciais, permitindo intervenções direcionadas e reduzindo a necessidade de tratamentos químicos.
- **Cultivo Vertical e Otimização de Espaço:** Algumas estufas inteligentes utilizam técnicas de cultivo vertical para maximizar a produção em uma área limitada.
- **Conectividade:** Estas estufas podem ser conectadas à Internet ou a outros sistemas para permitir monitoramento remoto, automação e integração com outros sistemas agrícolas.
- **Análise de Dados:** A coleta de dados permite que os agricultores analisem tendências ao longo do tempo, otimizem as práticas de cultivo e aumentem a eficiência.

Em resumo, as smartgreenhouses representam a vanguarda da agricultura moderna. Elas permitem uma produção mais eficiente, reduzem o impacto ambiental e podem resultar em produtos agrícolas de maior qualidade [6]. À medida que a tecnologia continua a avançar e se tornar mais acessível, é provável que vejamos padrões mais elevados e melhores práticas se estabelecendo no setor agrícola graças a essas inovações.

4. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os sistemas fotovoltaicos (PV, do inglês "Photovoltaic") são conjuntos de painéis ou células solares que convertem a luz do sol diretamente em eletricidade. Essa conversão é possível graças ao efeito fotovoltaico, em que a exposição à luz solar faz com que certos materiais liberem elétrons, gerando uma corrente elétrica. Sabemos que o principal propósito dos sistemas fotovoltaicos é a geração de energia elétrica de maneira renovável, limpa e, em muitos casos, economicamente viável. Ao contrário das fontes de energia convencionais, que dependem da queima de combustíveis fósseis ou de outros processos que podem ser poluentes e degradantes para o meio ambiente, os sistemas fotovoltaicos geram eletricidade sem emissões nocivas, reduzindo a pegada de carbono. De uma forma geral estes sistemas estão sendo utilizados em:

- **Residências:** Muitas casas ao redor do mundo estão adotando fotovoltaicos para reduzir a dependência de eletricidade da rede, diminuir a conta de luz e aumentar a autossuficiência energética.
- **Empresas e Indústrias:** Estabelecimentos comerciais e industriais estão implementando sistemas PV em grande escala, tanto para reduzir custos quanto para cumprir objetivos de sustentabilidade.
- **Agricultura:** Sistemas fotovoltaicos são usados para alimentar equipamentos agrícolas e irrigação, especialmente em áreas remotas onde a eletricidade da rede não estão prontamente disponíveis.

- **Zonas Remotas:** Em áreas distantes das redes elétricas tradicionais, sistemas fotovoltaicos oferecem uma solução para fornecer energia para comunidades e infraestruturas básicas.
- **Sistemas de Iluminação Pública:** Alguns governos estão implementando postes de luz alimentados por energia solar para iluminação pública, especialmente em áreas onde a instalação elétrica é desafiadora ou cara.
- **Veículos e Transporte:** Embora ainda em estágios iniciais, a tecnologia fotovoltaica está sendo explorada para uso em veículos, desde carros até barcos e aviões.
- **Usinas Solares:** Em escala maior, grandes usinas solares fotovoltaicas são estabelecidas para gerar eletricidade em massa, que é então distribuída para a rede elétrica.
- **Dispositivos e Eletrônicos Portáteis:** Carregadores solares portáteis estão se tornando populares para carregar dispositivos como telefones celulares e laptops em movimento.

Em suma, a tecnologia fotovoltaica está rapidamente se expandindo e encontrando aplicações em quase todos os setores da sociedade, impulsionada pela necessidade de fontes de energia mais limpas e pela contínua queda nos custos de produção e instalação. Com os avanços contínuos na eficiência das células solares e na economia de escala, espera-se que essa tendência continue crescendo no futuro previsível.

5. VIABILIDADE ECONÔMICA E FINANCEIRA.

A análise de viabilidade econômica e financeira é um estudo que visa determinar a possibilidade e a capacidade de um projeto ou investimento se tornar financeiramente sustentável e lucrativo ao longo do tempo [7]. Ela combina elementos quantitativos e qualitativos para avaliar se um determinado investimento deve ser perseguido.

5.1 DIFERENÇA ENTRE ECONÔMICA E FINANCEIRA:

Econômica: Refere-se à análise do valor do projeto para a sociedade ou mercado como um todo. Isso inclui benefícios intangíveis, externalidades (efeitos positivos ou negativos que afetam terceiros) e outras considerações que não se traduzem diretamente em fluxos monetários.

Financeira: Refere-se estritamente aos fluxos de caixa do projeto e se ele é viável do ponto de vista do retorno sobre o investimento. Esta análise foca em resultados tangíveis, como lucros, taxas de retorno, períodos de payback e outros indicadores financeiros.

Sabemos que a Análise de Viabilidade Econômica e Financeira serve para:

- **Tomada de Decisão:** Ela fornece informações críticas que auxiliam os investidores, gestores e stakeholders a tomar decisões informadas sobre se devem ou não prosseguir com um determinado projeto.
- **Identificação de Riscos:** Permite identificar e avaliar possíveis riscos associados ao projeto, possibilitando a elaboração de estratégias para mitigá-los.
- **Alocação de Recursos:** Ao determinar a viabilidade de um projeto, as organizações podem alocar seus recursos de forma mais eficiente, investindo em projetos que oferecem os melhores retornos e evitando aqueles que são menos prováveis de ter sucesso.
- **Projeção de Fluxos de Caixa:** Uma parte crucial da análise é projetar os fluxos de caixa futuros do projeto, o que ajuda a entender quando o investimento inicial pode ser recuperado e qual será o retorno esperado.
- **Avaliação de Alternativas:** A análise pode ser usada para comparar diferentes cenários ou alternativas de investimento para determinar qual oferece a melhor relação risco-retorno.

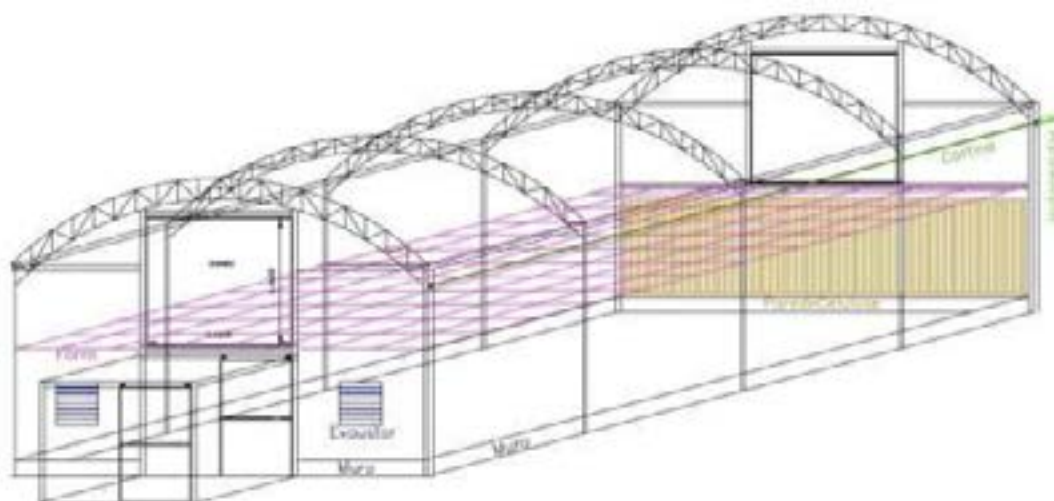
- **Atração de Investidores:** Um estudo de viabilidade bem elaborado pode ser usado para atrair investidores ao demonstrar que o projeto foi cuidadosamente analisado e tem boas chances de sucesso.

Em resumo, a análise de viabilidade econômica e financeira é uma ferramenta essencial na avaliação de projetos e investimentos. Ela permite que as organizações tomem decisões informadas, minimizem riscos e maximizem retornos, garantindo assim que os recursos sejam utilizados da maneira mais eficaz possível.

6. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Um modelo de casa de vegetação (Smartgreenhouse – Figura 02) foi implantado com a finalidade de cultivo de plantas de alto valor agregado. A estrutura aqui demonstrada possui área de 96m² com pé direito de 4 metros e cobertura metálica, foram utilizado filme difusor de 150 micras com tratamento contra raios UV.

Figura 02 – Planta Smartgreenhouse



Fonte: Dos autores do projeto

No âmbito do projeto de pesquisa foi avaliada a possibilidade de integração dos módulos do sistema fotovoltaico à arquitetura da casa de vegetação, entretanto, esta configuração foi descartada.

A integração de módulos fotovoltaicos à arquitetura da casa de vegetação teria impacto econômico negativo, uma vez que exigiria uma construção civil e mecânica de maior robustez, além de restrições nas tecnologias e modelos de módulos fotovoltaicos que poderiam compor o arranjo fotovoltaico.

Outro ponto importante está relacionado ao sombreamento que os módulos fotovoltaicos causariam no ambiente interno da estufa.

Os módulos fotovoltaicos para esta integração necessitam de parâmetros específicos associados à transmissividade da radiação solar, a fim de evitar sombreamentos no ambiente interior da casa de vegetação.

As restrições quanto à modelos e tecnologias de módulos fotovoltaicos também teriam impacto econômico negativo, uma vez que os custos de projeto e instalação do sistema fotovoltaico seriam maiores. Dessa forma, o sistema fotovoltaico foi instalado ao lado da casa de vegetação em uma construção física (casa) existente.

Após levantarem o estudo das topologias e configurações do sistema fotovoltaico, e com o auxílio de ferramentas computacionais, como os softwares SAM/NREL e Retscreen, identificaram que o sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR) mostrou-se mais técnico e economicamente viável em relação às demais topologias (híbrida independente e off Grid).

Nos momentos em que a central não gera energia suficiente para abastecer a unidade consumidora, a rede da distribuidora local suprirá a diferença. Nesse caso será utilizado o crédito de energia ou, caso não haja, o consumidor pagará a diferença [8]. Quando a unidade consumidora não utiliza toda a energia gerada pela central, ela é injetada na rede da distribuidora local, gerando crédito de energia.

Foram obtidos a partir do software SunData desenvolvido pelo Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB) do Centro de Pesquisas da Eletrobrás (CEPEL), os dados de radiação solar da cidade de Santa Rosa do Sul/SC, aonde encontra-se localizada a casa de vegetação juntamente com o sistema fotovoltaico implantado.

A partir do software SunData é possível determinar a irradiação solar média diária mensal no plano horizontal, em kWh/m². dia, conforme mostrado na figura 03 a seguir:

Figura 03 – Dados de radiação solar para a cidade de Santa Rosa do Sul/SC.

Mês	Nº dias	Irradiação Solar no Plano Horizontal (kWh/m ² .dia)	Irradiação Solar no Plano Inclinado (kWh/m ² .dia)	Produtividade de Referência (kWh/kW.dia)
Jan	31	5,14	5,10	5,10
Fev	28	4,86	5,03	5,03
Mar	31	4,20	4,67	4,67
Abr	30	3,67	4,45	4,45
Mai	31	2,85	3,78	3,78
Jun	30	2,41	3,28	3,28
Jul	31	2,66	3,54	3,54
Ago	31	3,34	4,10	4,10
Set	30	3,39	3,74	3,74
Out	31	3,97	4,15	4,15
Nov	30	5,23	5,14	5,14
Dez	31	5,45	5,24	5,24
Média		3,65	4,18	4,18

Fonte: Dos autores do projeto

Um sistema fotovoltaico de referência foi modelado e simulado no software SAM/NREL. A partir dos resultados da simulação, em base mensal, foram determinados indicadores de desempenho típicos para o estado de Santa Catarina. Entre os indicadores, um perfil mensal da taxa ou razão de desempenho ou Performance Ratio (PR) foi determinado [10].

A estimativa de energia elétrica a partir do método analítico foi realizada considerando uma gama de potência nominal de sistema fotovoltaico variando entre 3 kWp e 8 kWp, os valores médios mensais de PR e a produtividade de referência média diária mensal.

Para as estimativas dos custos de instalação para o consumidor final, foram considerados dois cenários, sendo que o primeiro cenário considerou os valores médios para o mercado brasileiro, R\$4,80/Wp, e o segundo cenário considerou os valores precificados com 20% acima dos valores médios para o mercado brasileiro.

A partir da demanda energética da casa de vegetação foi definido um sistema fotovoltaico com potência instalada de 6,35 kWp, mostrados nas figuras 04 e 05 a seguir:

Figura 04 – SFCR de Santa Rosa do Sul/SC

Potência (kWp)		3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
	PR	E Mensal (kWh)	E Mensal (kWh)	E Mensal (kWh)	E Mensal (kWh)	E Mensal (kWh)	E Mensal (kWh)
Jan	0,79	375,5	500,6	625,8	750,9	876,1	1001,2
Fev	0,79	333,0	444,0	555,0	666,0	777,0	888,0
Mar	0,80	345,8	461,1	576,3	691,6	806,8	922,1
Abr	0,81	322,9	430,6	530,2	645,9	753,5	861,1
Mai	0,82	287,3	383,0	478,8	574,5	670,3	766,0
Jun	0,82	243,4	324,5	405,6	486,8	567,9	649,0
Jul	0,82	270,2	360,3	450,4	540,4	630,5	720,6
Ago	0,82	313,3	417,8	522,2	628,6	731,1	835,5
Set	0,82	274,5	366,0	457,5	549,0	640,5	732,0
Out	0,80	309,8	413,1	516,3	619,6	722,9	826,1
Nov	0,79	367,2	489,6	612,0	734,4	856,8	970,2
Dez	0,79	386,3	515,0	643,8	772,6	901,3	1030,1
E Total (kWh)		3829,1	5105,5	6381,9	7658,3	8934,7	10211,1
YF (kWh/kWp)		1276,4	1276,4	1276,4	1276,4	1276,4	1276,4
E Mensal (média) (kWh)		319,1	425,5	531,8	638,2	744,6	850,9
R\$ mercado fv médio		R\$ 16575	R\$ 19520	R\$ 23775	R\$ 27780	R\$ 31535	R\$ 35040
R\$ mercado fv médio + 20%		R\$ 19890	R\$ 23424	R\$ 28530	R\$ 33336	R\$ 37842	R\$ 42048

Fonte: Dos autores do projeto

Figura 05 – O sistema fotovoltaico aplicado à estufa.

Descrição	Unidade	Quantidade
Inversor solar de 5 kW monofásico 220 V, com 2 MPPTs e monitoramento wifi, do fabricante Growatt;	Un.	1
Módulos fotovoltaicos de 455 Wp cada um, do fabricante Canadian Solar	Un.	14
Estrutura de Módulos fotovoltaicos	Un	4
Sistema de Monitoramento	Um	1

Fonte: Dos autores do projeto

Além dos dados técnicos informados acima, o sistema possui garantia dos equipamentos e serviços de 25 anos e de garantia com relação a defeito de fabricação.

A imagem da tabela abaixo, figura 06, apresenta a estimativa de geração de energia elétrica mensal para o sistema fotovoltaico de Santa Rosa do Sul/SC, local aonde está sendo desenvolvido o projeto da casa de vegetação eficiente energeticamente.

Figura 06 – O sistema fotovoltaico aplicado à estufa.

Santa Rosa do Sul/SC			
	Potência (kWp)	6,00	6,35
Mês	PR	Energia (kWh)	Energia (kWh)
Jan	0,792	750,93	794,73
Fev	0,788	665,98	704,83
Mar	0,796	691,58	731,92
Abr	0,806	645,86	683,53
Mai	0,817	574,51	608,02
Jun	0,824	486,76	515,15
Jul	0,821	540,45	571,97
Ago	0,822	626,64	663,19
Set	0,816	549,01	581,04
Out	0,803	619,60	655,74
Nov	0,794	734,41	777,25
Dez	0,793	772,56	817,63
E Anual (kWh)		7.658,29	8.105,03
YF (kWh/kWp)		1.276,38	1.350,84
E Média (kWh/mês)		638,19	675,42

Fonte: Dos autores do projeto

Considerando que o projeto da casa de vegetação construído na cidade de Santa Rosa do Sul – SC área rural, tendo como concessionária de energia responsável CELESC, será considerado a taxa de energia referente ao tipo de consumidor de classificação 02 – Industrial/Convencional Trifásica, grupo B [10],[11].

Como não há ainda histórico dos dados de consumo da casa de vegetação, definiu-se que para realização dos cálculos de análise do investimento o consumo de energia da casa de vegetação será igual a energia elétrica gerada pelo sistema fotovoltaico, sem excedente de geração.

Dessa forma, levantaram-se os dados referente ao valor em R\$ do kWh (com impostos) dos últimos 12 meses para cálculo do custo mensal da energia elétrica, conforme tabela abaixo representada pela figura 07.

Estimasse que a casa de vegetação terá um consumo de energia anual de 8.105,03 kWh e um consumo médio por mês de 675,42kWh/mês com um anual de aproximadamente R\$ 5.684,45

Figura 08 – O sistema fotovoltaico aplicado à estufa.

Mês	Consumo kWh/mês	Valor kWh (com impostos e taxas)	Custo conta/Mês
Julho/2021	571,97	0,67	R\$ 383,22
Agosto/2021	663,19	0,68	R\$ 450,96
Setembro/2021	581,04	0,68	R\$ 395,11
Outubro/2021	655,74	0,73	R\$ 478,69
Novembro/2021	777,25	0,74	R\$ 575,16
Dezembro/2021	817,63	0,74	R\$ 605,05
Janeiro/2022	794,73	0,63	R\$ 500,68
Fevereiro/2022	704,83	0,63	R\$ 444,43
Março/2022	731,92	0,73	R\$ 534,30
Abril/2022	683,53	0,72	R\$ 492,14
Mai/2022	608,02	0,73	R\$ 443,85
Junho/2022	515,15	0,74	R\$ 381,21
Média	675,42		R\$ 473,70
Anual	8.105,03		R\$ 5.684,45

Fonte: Dados da geração do sistema solar mensal juntamente com o custo do kWh pela Celeso dos últimos 12 meses de uma residência localizada no mesmo local onde o projeto da casa de vegetação está sendo construído em Santa Rosa do Sul.

Fonte: Dos autores do projeto

6.1 INDICADORES DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Os indicadores de viabilidade financeira e econômica são ferramentas que permitem avaliar se um projeto ou investimento é ou não atrativo do ponto de vista financeiro e econômico. Eles fornecem informações valiosas sobre a rentabilidade, riscos, tempo de retorno do investimento, entre outros aspectos. Os principais indicadores de viabilidade são:

A. Valor Presente Líquido (VPL ou NPV, em inglês): Indica o valor atualizado de um fluxo de caixa futuro. Um VPL positivo sugere que o projeto trará retorno acima do custo do capital, tornando-se atrativo.

B. Taxa Interna de Retorno (TIR ou IRR, em inglês): Representa a taxa de desconto que torna o VPL igual a zero. Se a TIR for maior que o custo do capital ou a taxa mínima de atratividade, o projeto é considerado viável.

C. Payback simples: Indica o tempo necessário para que o investimento inicial seja recuperado por meio dos fluxos de caixa gerados pelo projeto. Quanto menor o período de payback, mais atrativo é o projeto.

D. Payback descontado: Semelhante ao payback simples, mas considera o valor presente dos fluxos de caixa futuros, ou seja, desconta o valor dos fluxos de caixa utilizando uma taxa de desconto.

E. Índice de Lucratividade (IL): Este índice é a relação entre o VPL e o investimento inicial. Um IL maior que 1 indica que o projeto é lucrativo.

F. Relação Benefício-Custo (B/C): Representa a relação entre os benefícios (ou retornos) de um projeto e seus custos. Uma relação B/C superior a 1 sugere que os benefícios superam os custos, tornando o projeto viável.

Estes indicadores, quando usados em conjunto, oferecem uma visão abrangente sobre a viabilidade de um projeto [12]. No entanto, é essencial lembrar que cada projeto tem suas especificidades e nuances, portanto, é fundamental uma análise detalhada considerando todos os fatores relevantes[13].

6.2 ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA DO SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA APLICADO A UMA SMARTGREENHOUSE

Com base nos dados fornecidos a seguir na utilização dos recursos de consumo de energia para a Smartgreenhouse em estudo mostrada na figura 09 foram realizadas as análises da expectativa do retorno, das estimativas conforme os cenários a seguir, definidos como – Cenário 01 (Recursos próprios) e Cenário 02 (Financiamento).

Figura 09 – Smartgreenhouse Santa Rosa do Sul/SC



Fonte: Dos autores do projeto

6.2.1 CENÁRIO 01 (RECURSOS PRÓPRIOS)

Custo de aquisição e instalação do sistema de BRL 32.000,00 + custo de manutenção (garantia dos módulos e operação do sistema) de BRL 6.000,00, totalizando um investimento de BRL 38.000,00.

O fluxo de caixa para cada ano será o valor médio dos seis meses de maior consumo de eletricidade gasto (NOV/2021 a JUN/2023 com um valor de BRL 529,33) multiplicado por 12 meses.

A taxa mínima de atratividade correspondente a uma aplicação em carteira de poupança nos últimos 12 meses = 6,45%. Adotamos o sistema de payback simples, como finalidade de estudo, mostrado na figura 10 abaixo:

Figura 10 – PAYBACK – Cenário 01 (Recursos próprios)

Ano	Investimento do Projeto (25 anos)	Fluxo de Caixa	Payback
Ano 0	- R\$ 38.000,00		
Ano 1		R\$ 6.303,48	- R\$ 31.696,52
Ano 2		R\$ 6.303,48	- R\$ 25.393,04
Ano 3		R\$ 6.303,48	- R\$ 19.089,56
Ano 4		R\$ 6.303,48	- R\$ 12.786,08
Ano 5		R\$ 6.303,48	- R\$ 6.482,60
Ano 6		R\$ 6.303,48	R\$ 179,12
Ano 7		R\$ 6.303,48	R\$ 6.124,36
Ano 8		R\$ 6.303,48	R\$ 12.427,84
Ano 9		R\$ 6.303,48	R\$ 18.731,32
Ano 10		R\$ 6.303,48	R\$ 25.034,80
Ano 11		R\$ 6.303,48	R\$ 31.338,28
Ano 12		R\$ 6.303,48	R\$ 37.641,76
Ano 13		R\$ 6.303,48	R\$ 43.945,24
Ano 14		R\$ 6.303,48	R\$ 50.248,72
Ano 15		R\$ 6.303,48	R\$ 56.552,20
Ano 16		R\$ 6.303,48	R\$ 62.855,68
Ano 17		R\$ 6.303,48	R\$ 69.159,16
Ano 18		R\$ 6.303,48	R\$ 75.462,64
Ano 19		R\$ 6.303,48	R\$ 81.766,12
Ano 20		R\$ 6.303,48	R\$ 88.069,60
Ano 21		R\$ 6.303,48	R\$ 94.373,08
Ano 22		R\$ 6.303,48	R\$ 100.676,56
Ano 23		R\$ 6.303,48	R\$ 106.980,04
Ano 24		R\$ 6.303,48	R\$ 113.283,52
Ano 25		R\$ 6.303,48	R\$ 119.587,00

Fonte: Dos autores do projeto

Sistema de payback simples, para fins de estudo;
 O projeto é praticamente pago no ano 5, com payback total no ano 6;
 Ao final de 25 anos, a implementação do sistema solar renderá BRL 119.587,00.

VPL – CASO 1 (Recursos próprios)

De acordo com Macedo (2014, p.63), a fórmula do VPL é:

$$VPL = -CF_0 + \sum \frac{CF_j}{(1+i)^n}$$

Onde,

(-CF₀) = Fluxo de caixa inicial;

(CF_j) = Fluxo de caixa esperado;

i = TMA (taxa mínima de atratividade);

n = período de tempo.

Para tanto, o valor do VPL será apresentado a partir do fluxo de caixa inicial de - R\$ 38.000,00 mais o somatório do fluxo de caixa esperado por ano de R\$ 6.303,48 descontado pela taxa de 6,45% no período de 25 anos. Ao realizar o cálculo obteve-se o valor do VPL de R\$ 39.246,06 informando que o projeto se torna viável, uma vez que, para que o mesmo seja aceito, o VPL deverá ter valor positivo, ou seja, maior que zero.

Resumindo: Fluxo de caixa inicial de -BRL 38.000,00, mais a soma do fluxo de caixa esperado por ano de BRL 6.303,48 descontado à taxa de 6,45% no período de 25 anos. O valor do VPL é de BRL 39.246,06.

Como VPL > 0, então o projeto é considerado viável.

Taxa Interna de Retorno (TIR) – CASO 1 (Recursos próprios)

De acordo com Macedo (2014, p.68), a fórmula da TIR é:

$$CF_0 + \sum \frac{CF_n}{(1 + TIR)^n} = 0$$

Onde,

CF_n = Fluxo de caixa de entradas

CF₀ = Fluxo de caixa inicial

n = período de tempo de movimento de fluxo de caixa

A partir dessa equação, obtivemos o valor da TIR de 16,20%. Para um projeto ser economicamente atraente, o valor da TIR precisa ser maior que a taxa mínima de atratividade. Desse modo, podemos afirmar que a implantação do sistema fotovoltaico é viável, uma vez que a TMA é de 6,45%, ou seja, menor que o valor apresentado pela TIR.

6.2.2 ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA DO SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA APLICADO A UMA ESTUFA – CENÁRIO 02 (FINANCIAMENTO)

Escolheu-se a linha de financiamento da Caixa Econômica Federal de sistemas fotovoltaicos, com 100% do valor financiado, onde a taxa de juros é fixa no valor de 1,17% ao mês, (14,98% a.a) com 6 meses de prazo de carência e pagamento em até 5 anos. Sendo assim, ao financiar o valor do investimento de R\$ 38.000,00, somando mais a taxa de abertura de crédito, tem-se como valor inicial de R\$ 39.433,67. Os cálculos do financiamento foram realizados com base da tabela PRICE (sistema de amortização pela Caixa Econômica), que tem como consequência realizar a amortização da dívida em parcelas iguais ao longo do financiamento. O valor final total a pagar será de R\$ 56.184,87, ao fim dos 60 meses, com valor de pagamento mensal dos seis primeiros meses aproximadamente de R\$ 463,00 (carência de 6 meses, cobrado apenas os juros sem a amortização do valor) e o restante dos meses com parcelas de R\$ 994,52. A figura 11 a seguir mostra os valores e payback.

Figura 11 – PAYBACK – Cenário 02 (financiamento)

Ano	Investimento do Projeto (25 anos)	Fluxo de Caixa	Payback
Ano 0	- R\$ 56.184,87		
Ano 1		R\$ 6.303,48	- R\$ 49.881,39
Ano 2		R\$ 6.303,48	- R\$ 43.577,91
Ano 3		R\$ 6.303,48	- R\$ 37.274,43
Ano 4		R\$ 6.303,48	- R\$ 30.970,95
Ano 5		R\$ 6.303,48	- R\$ 24.667,47
Ano 6		R\$ 6.303,48	- R\$ 18.363,99
Ano 7		R\$ 6.303,48	- R\$ 12.060,51
Ano 8		R\$ 6.303,48	- R\$ 5.757,03
Ano 9		R\$ 6.303,48	R\$ 546,45
Ano 10		R\$ 6.303,48	R\$ 6.849,93
Ano 11		R\$ 6.303,48	R\$ 13.153,41
Ano 12		R\$ 6.303,48	R\$ 19.456,89
Ano 13		R\$ 6.303,48	R\$ 25.760,37
Ano 14		R\$ 6.303,48	R\$ 32.063,85
Ano 15		R\$ 6.303,48	R\$ 38.367,33
Ano 16		R\$ 6.303,48	R\$ 44.670,81
Ano 17		R\$ 6.303,48	R\$ 50.974,29
Ano 18		R\$ 6.303,48	R\$ 57.277,77
Ano 19		R\$ 6.303,48	R\$ 63.581,25
Ano 20		R\$ 6.303,48	R\$ 69.884,73
Ano 21		R\$ 6.303,48	R\$ 76.188,21
Ano 22		R\$ 6.303,48	R\$ 82.491,69
Ano 23		R\$ 6.303,48	R\$ 88.795,17
Ano 24		R\$ 6.303,48	R\$ 95.098,65
Ano 25		R\$ 6.303,48	R\$ 101.402,13

Fonte: Dos autores do projeto

Neste segundo caso o fluxo de caixa de cada ano continua sendo a média dos seis maiores meses de consumo de energia elétrica gastos (R\$ 525,29) multiplicado por 12 meses. A taxa mínima de atratividade correspondente a uma aplicação de carteira de poupança dos últimos 12 meses, conforme caso anterior, sendo ela de 6,45%. Ao realizar o payback simples, na tabela abaixo é possível visualizar o novo fluxo de caixa, onde o investimento do projeto fotovoltaico teria retorno a partir do ano 9 de funcionamento do sistema

VPL (Valor Presente Líquido) – Cenário 02 (financiamento).

Usando o mesmo fluxo de caixa de BRL 6.303,48 por ano, no período de 25 anos, o valor foi de BRL 21.061,19.

Como $VPL > 0$, então o projeto é viável.

Taxa Interna de Retorno (TIR) – CASO 2 (financiamento)

TIR = 10,24%.

Como $TIR > 6,45\%$ (Taxa Mínima de Atratividade), isso demonstra a aprovação do projeto.

Seguindo a análise, ao calcular o valor da TIR, a partir dos dados informados, obteve-se o valor de 10,24%, sendo assim, um valor maior quanto a taxa mínima de atratividade (6,45%), demonstrando aprovação do projeto.

7. VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÃO

Para o cenário 1, o projeto apresenta um retorno em menos de 6 anos, um VPL positivo e uma TIR superior à taxa mínima de atratividade. Avaliando a economicidade do projeto fotovoltaico e tendo em vista que os indicadores alcançaram os parâmetros mínimos estipulados, concluímos que a implementação do sistema fotovoltaico na estufa é mais benéfica do que investir na caderneta de poupança, uma vez que oferece um retorno financeiro mais compensador.

No cenário 2, que considera o financiamento, o estudo de viabilidade para a implementação do sistema solar indica um payback no nono ano. Contudo, é relevante destacar que, mesmo levando 9 anos para atingir o payback, isso não representa nem metade da vida útil esperada do projeto.

Quanto à viabilidade econômica, os indicadores VPL e TIR alcançaram os critérios mínimos determinados, o que classifica o projeto como economicamente favorável.

Outro aspecto relevante é levar em conta as variações de impostos e tarifas ao longo do tempo. Estes podem experimentar elevações relacionadas ao fornecimento de energia elétrica. Optando pela energia gerada pelo sistema fotovoltaico, o usuário evita esses custos adicionais e, no futuro, pode até expandir a capacidade de seu sistema e comercializar o excedente de energia produzida.

8. AGRADECIMENTOS

Agradecemos especialmente às organizações e instituições da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC Araranguá), representada por LabTel (Laboratório de Telecomunicações), LPA (Laboratório de Pesquisa Aplicada) e laboratórios NTEEL (Núcleo Tecnológico de Energia Elétrica); o Instituto Federal Catarinense (IFC Santa Rosa do Sul); **Foz do Chapecó Energia SA; CSC Energia; Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)**; e Fundação de Amparo à Pesquisa e Extensão Universitária (FAPEU), todos membros do projeto de pesquisa (P&D – ANEEL) intitulado “Desenvolvimento de estufas inteligentes e eficientes energeticamente para cultivo de plantas de alto valor agregado aplicado a comunidades lindeiras ou assentadas de usinas hidrelétricas.”

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília: Tda Comunicação, 2008. 236 p. Disponível em: <www.aneel.gov.br>.

[2] ALI, A.; HASSANEIN, H. S. Wireless Sensor Network and Deep Learning For Prediction Greenhouse Environments. In: 2019 INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART APPLICATIONS, COMMUNICATIONS AND NETWORKING (SMARTNETS), 2019, Sharm El Sheikh. Conference Paper [...]. Sharm El Sheikh: IEEE, 2019. p. 1-5. ABREU, Paulo Simas de;

[3] ACHOUR Yasmine; OUAMMI Ahmed; ZEJLI Driss. Technological progresses in modern sustainable greenhouses cultivation as the path towards precision agriculture, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 147, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032121005384>. Acesso: julho de 2022.

[4] ALI, A.; HASSANEIN, H. S. Time-Series Prediction for Sensing in Smart Greenhouses. In: GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE GLOBAL COMMUNICATIONS CONFERENCE, 2020, Taipei. Conference Paper [...]. Taiwan: IEEE, 2020.

[5] FERNANDES, D. G. (2017). Sistema automatizado de controle de estufas para cultivo de hortaliças. Universidade Federal de Santa Maria. Trabalho de Conclusão de Curso. Campus de Frederico Westphalen, Curso de Sistemas de Informação, RS.

[6] AHAMED, Md Shamim; GUO, Huiqing; TANINO, Karen. Energy saving techniques for reducing the heating cost of conventional greenhouses, Biosystems Engineering, Volume 178, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1537511018303957>. Acesso em: julho de 2022.

[7] STEPHAN, Christian. Análise de Investimentos. Rio de Janeiro: Campus, 1982. 280 p.

[8] Caderno Temático ANEEL, Micro e Minigeração Distribuída, Sistema de Compensação de Energia Elétrica, 2^a edição, 2016. Disponível em: <https://www.geracaodistribuida.com/wp-content/uploads/2017/06/caderno-tematicomicro-e-minigeracao-distribuida-2-edicao.pdf>. Acesso: jul. 2022.

[9] PORTAL CELESC. Conta de energia. Disponível em: <https://portal.celesc.com.br/conta-de-energia>. Acesso em: 26 de ago. 2022.

[10] LIN, D.; ZHANG, L.; XIA, X. Model predictive control of a Venlo-type greenhouse system considering electrical energy, water and carbon dioxide consumption. *Applied Energy*, [S.L.], v. 298, p. 117163, jun. 2021

[11] ZHANG, W. et al. Robust Model-based Reinforcement Learning for Autonomous Greenhouse Control. *arXiv Preprint*, 2021. Submetido em 26 Ago. 2021. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2108.11645>. Acesso em: mar. 2022.

[12] MACEDO, Joel de Jesus. Análise de projeto e orçamento empresarial [livro eletrônico]. Curitiba: Inter Saberes, 2014. (Série Gestão Financeira).

[13] Methodologies of control strategies for improving energy efficiency in agricultural greenhouses. *Journal Of Cleaner Production*, [S.L.], v. 274, p. 122695, nov. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122695>. Acesso: mai. 2022.



42º SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil
26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de
Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDR
*25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming
Conference / 9th BrDDR Congress*

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

UTILIZAÇÃO DE GERADORES TERMOELÉTRICOS NA CAPTAÇÃO DE CALOR RESIDUAL DE PLACAS FOTOVOLTAICAS – UMA VISÃO GERAL

Gerson Paz Teixeira⁽¹⁾
Lirio Schaeffer⁽²⁾

ABSTRACT

A conversão da irradiação solar em energia elétrica, através da utilização de placas fotovoltaicas, tornou-se uma fonte de energia renovável de grande relevância nos sistemas de distribuição de energia. Somente no Brasil, temos 32 gigawatts (GW) de potência instalada, segundo dados da ABSOLAR. Essa produção corresponde a 14,17% da matriz elétrica considerando a produção nas usinas de grande porte e nos sistemas de geração distribuída. Desta forma tornou-se a segunda maior fonte do país. O crescimento médio é de 1 GW/mês no período de julho de 2022 a maio de 2023. Apesar dos sistemas solares fotovoltaicos terem uma ótima participação na produção de energia e contribuindo para evitar a emissão de CO₂ na atmosfera, sabemos que esses sistemas apresentam perdas inerentes no seu processo de conversão. Diante disso temos um percentual de conversão entre 16 a 25 % . Esses valores de conversão também são dependentes do tipo de célula fotovoltaica utilizada na placa. Este trabalho irá apresentar os resultados obtidos na utilização de geradores termoelétricos, aplicados na parte traseira de placas solares fotovoltaicas, com o objetivo de realizar uma cogeração de energia. Essa combinação entre placas fotovoltaicas e geradores termoelétricos, é denominada de sistema híbrido.

Palavras-chave — geradores termoelétricos, placas fotovoltaicas, cogeração de energia, sistemas híbridos.

⁽¹⁾MSc Eng. Gerson Paz Teixeira, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, g.teixeira05@gmail.com.

⁽²⁾ Prof. Dr. Ing. Lirio Schaefer, Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil.

1. INTRODUÇÃO

A sustentabilidade energética tem como condição essencial o suprimento eficiente e universal de energia. Segundo Reis [1] esse suprimento é considerado uma condição básica para o desenvolvimento econômico, independentemente do conceito que se utilize para desenvolvimento. Nesse contexto o acesso de cada ser humano a uma quantidade mínima de bens energéticos, que se adapte aos atendimentos de suas necessidades básicas, deve ser considerado como um requisito de sustentabilidade. Ainda conforme Reis [1] a maior eficiência energética e a transição para o uso maciço de recursos primários renováveis têm sido ressaltadas como soluções a serem buscadas no contexto de um modelo sustentável. Para isso é necessário o desenvolvimento tecnológico e o uso de soluções inovadoras nos processos de geração de energia elétrica.

Dentro desse contexto, podemos afirmar que o sol é a fonte de energia renovável com maior capacidade de fornecimento de potência. Essa afirmação consolida-se pelo fato de que a radiação solar, que atinge a superfície da Terra, é de aproximadamente $1,2 \times 10^5$ TW, o que é muito maior do que a energia consumida pela população mundial. A maneira mais utilizada de energia solar é a conversão de eletricidade em energia térmica. A energia fotovoltaica (PV) converte as radiações solares diretamente em eletricidade. A energia térmica também pode ser convertida em eletricidade. Um método viável seria através da utilização do gerador termoelétrico (TEG). O gerador termoelétrico tem muitas vantagens, como não produzir emissões de gás, a sua operação ocorre em estado sólido, é livre de manutenção, sem partes móveis e reações químicas, ampla escalabilidade, longa vida útil e de operação confiável, não provocando nenhum dano ao meio ambiente. Portanto, a combinação de PV e TEG podem ser consideradas como uma alternativa para um sistema de cogeração de energia. Esta aplicação conjunta da PV e TEG é denominado de sistema híbrido.

Os sistemas híbridos PV e TEG podem ser apresentados de duas formas: utilizando os dois componentes separados, chamados PV-TEG ou usando os dois componentes conectados termicamente, denominados PV/TEG. Na figura 1, temos a ilustração no formato PV-TEG:

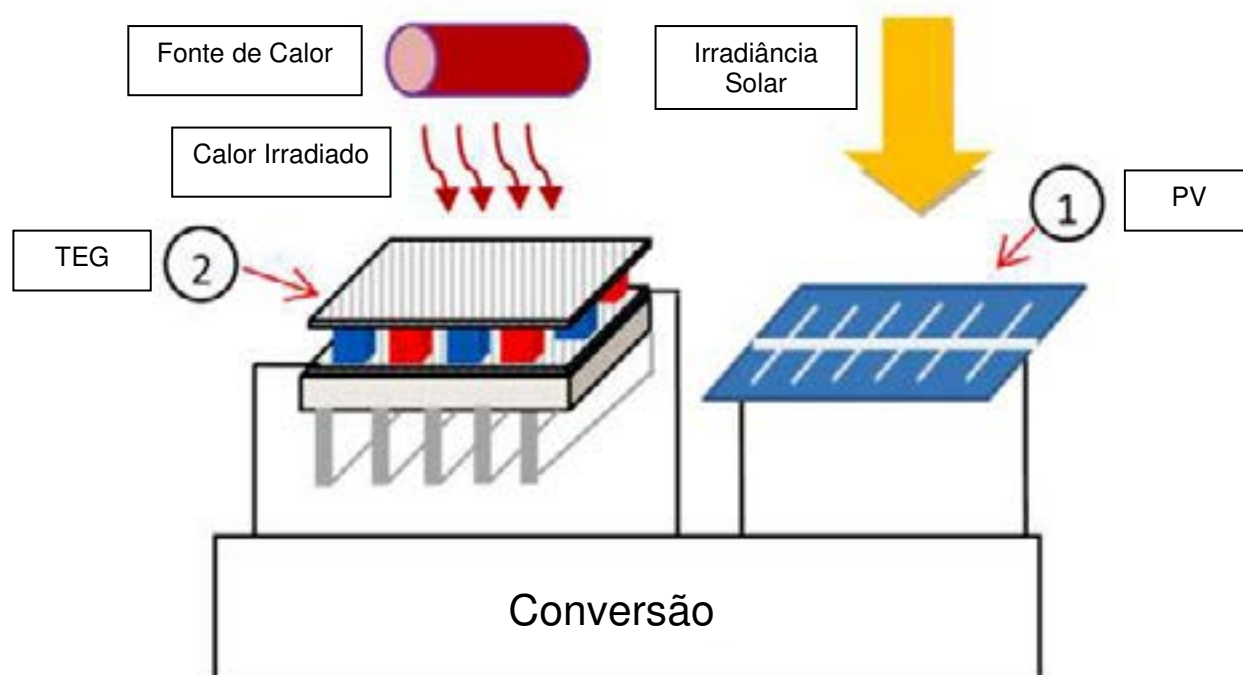


Figura 1: Sistema Híbrido PV-TEG. Adaptado de [2].

O sistema PV/TEG é apresentado na figura 2:

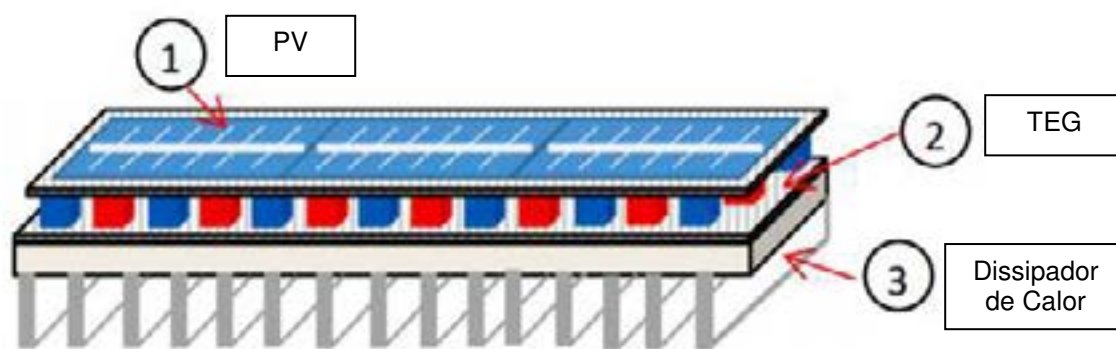


Figura 2: Sistema Híbrido PV/TEG. Adaptado de [2].

Comparando as duas figuras, nota-se que na figura 1 temos duas fontes de energia separadas e na figura 2 temos um sistema único.

Durante o processo de geração termoelétrica em um TEG, são muitas variáveis presentes na conversão de energia. Analisando o processo térmico, devemos considerar os seguintes elementos do material termoelétrico: a sua resistência e condutividade elétrica, a condutividade térmica, o coeficiente Seebeck e o gradiente de temperatura. O equacionamento desses elementos resulta na figura de mérito, cujo símbolo é ZT . Para termos um melhor valor de ZT , o material termoelétrico deverá apresentar uma alta condutividade elétrica, baixa condutividade térmica e elevado coeficiente Seebeck [3]. Portanto, a eficiência de um dispositivo termoelétrico depende tanto da temperatura de operação dos materiais quanto das suas características térmicas e elétricas. Estes fatores, tornam-se evidentes, ao analisarmos a equação 1 de ZT :

$$Z\bar{T} = \left(\frac{\alpha^2}{\sigma k}\right) \bar{T} \quad (1)$$

Onde:

$Z\bar{T}$ = Figura de mérito

α = Coeficiente Seebeck

σ = Condutividade elétrica

k = Condutividade térmica

T = Diferença de temperatura entre o lado quente e frio da célula/módulo termoelétrico

Conforme apresentado na equação 1, o valor da temperatura é de grande relevância para a geração termoelétrica. Dessa forma, a temperatura na placa solar fotovoltaica, é determinante para o valor do gradiente de temperatura do módulo. Esse coeficiente de temperatura considera as temperaturas existentes entre as camadas da placa. Porém a relação entre a irradiância solar e a temperatura ambiente são dois fatores interdependentes.

O coeficiente de temperatura das células em placas solares fotovoltaicas foi determinado por R.G.J. Ross, conhecido como coeficiente de Ross [4,5]. Sua equação é a seguinte:

$$T_{célula} = T_{ambiente} K_s G_i \quad (2)$$

Onde:

$T_{ambiente}$ = Temperatura ambiente

K_s = Coeficiente Ross

G_i = Irradiação Solar

2. PARÂMETROS DE DESEMPENHO

O desempenho das células fotovoltaicas é diferente, devido a sua evolução tecnológica. Essa evolução é devido aos tipos de materiais utilizados em cada uma das gerações:

Geração 1: Estrutura Cristalina

Geração 2: Filmes Finos

Geração 3: Nanocristalinos

Geração 4: Orgânicos e Inorgânicos com diferentes arquiteturas.

Os parâmetros de desempenho, dessas gerações de placas fotovoltaicas, são apresentados na tabela 1:

Tabela 1: Células Fotovoltaicas – Gerações Tecnológicas

Célula Fotovoltaica (Geração)	η (%)	$P_{máx}$ (W)	I_{cc} (A)	V_{CA} (V)	Área (cm²)
Silício Cristalino (1)	26,7 ± 0,5	2,1100	3,36900	0,738	79
Silício Amorfo (2)	10,2 ± 0,3	0,0102	0,01637	0,896	1,001
Dye (3)	11,9 ± 0,4	0,0119	0,02258	0,744	1,005
CIGS (2)	22,9 ± 0,5	0,0239	0,04036	0,744	1,041
CdTe (2)	21,0 ± 0,4	0,0223	0,03213	0,876	1,0623
Perovskite (3)	22,6 ± 0,6	0,0225	0,02273	1,178	1,0189
InGaP/GaAs/ InGaAs (3)	37,9 ± 1,2	0,0397	0,01494	3,065	1,047
Cinco Junções (3)	38,8 ± 1,2	0,0388	0,00956	4,767	1,021
Orgânica (4)	15,2 ± 0,2	0,0152	0,02400	0,847	1,015

Fonte: Adaptado de [2]

Na Tabela 1, são apresentados os principais parâmetros: eficiência (η), potência máxima (W), corrente de curto-circuito (A) e tensão de circuito aberto (V), em condições padrões de teste - Irradiância de 1000 W/m², temperatura de 25 °C e massa de ar 1,5 [2].

O parâmetro de eficiência comprova que os painéis fotovoltaicos de silício cristalino, devido ao seu alto rendimento, são os mais utilizados nas aplicações comerciais e industriais.

A resposta espectral das células fotovoltaicas é fortemente influenciada pela “bandgap” de energia, devido ao material utilizado, pois parte do espectro solar refletido nas células fotovoltaicas devem corresponder à resposta espectral e conseqüentemente irá maximizar o desempenho do gerador termoelétrico. Esse desempenho otimizado também depende da estrutura e forma geométrica dos elementos que compõem os sistemas híbridos. Portanto as estruturas das células fotovoltaicas e dos geradores termoelétricos são fatores importantes no desempenho de um sistema híbrido.

2.1 ESTRUTURA DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

A arquitetura das células fotovoltaicas passou por diversas modificações para aumentar a eficiência. A maioria das células fotovoltaicas atuais possui estruturas complexas.

2.1.1 Contatos

O formato e a posição dos de contatos sofreram sucessivas modificações. A figura 3 apresenta a estrutura da primeira célula de junção PN. Russel Ohl cortou uma seção do lingote de silício, incluindo a parte superior, barreira e inferior e anexou os eletrodos nas partes superiores e inferiores. Esta célula tinha um rendimento de aproximadamente 1%. A forma do contato frontal foi um dos fatores preponderantes para esse resultado [6].

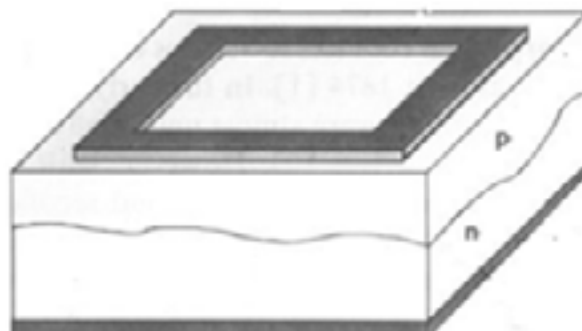


Figura 3- Célula P-N Ohl [2]

Com a distribuição dos contatos na parte frontal e traseira tivemos uma evolução no rendimento. Dois exemplos são as células bifaciais PERC e do fabricante Maxeon, correspondendo às figuras 4a e 4b. Na PERC os contatos têm formato de pirâmides invertidas e a presença de prata e alumínio. A figura 4b apresenta as células monocristalinas do fabricante Maxeon todos os contatos estão na parte traseira deixando toda área frontal ativa.

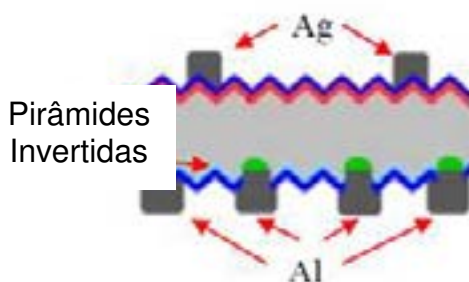


Figura 4a: Célula PERC [7]



Figura 4b: Célula do Fabricante Maxeon [8]

As melhores células fotovoltaicas, em luz concentrada, são as multijunções, sendo as mais utilizadas às células fotovoltaicas de junção tripla. A estrutura da célula fotovoltaica de junção tripla está representada na Fig. 5. Ela consiste em: três junções - InGaP, GaAs e InGaAs, duas junções de túnel (TJ) com a função de minimizar a absorção parasitária e a resistência em série, camada tampão (BL) e contatos.

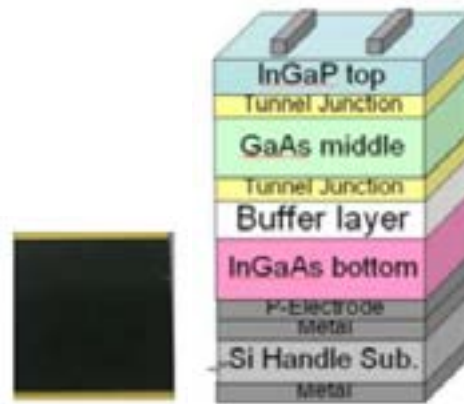


Figura 5: Célula Multijunção adaptado [9]

A evolução dos contatos frontais para células fotovoltaicas desde a forma mais simples na figura 6a até o formato para células concentradoras de pequeno tamanho nas figuras 6b e 6c.



Figura 6a–Célula de Ohl [2]

Figura 6b–Grade Retangular [2]

Figura 6c–Grade Quadrada

[2]

2.1.2 Barramentos e Dedos

Os tamanhos dos barramentos e o espaço entre os dedos são parâmetros críticos para melhorar a eficiência da célula fotovoltaica de silício. As otimizações dos tamanhos devem levar à redução da resistência em série e à maximização da área ativa frontal da célula fotovoltaica. Infelizmente, esses tamanhos dependem da taxa de concentração. A otimização do tamanho deve ser o ponto de referência entre os três parâmetros [10]. A figura 7 apresenta esta disposição:

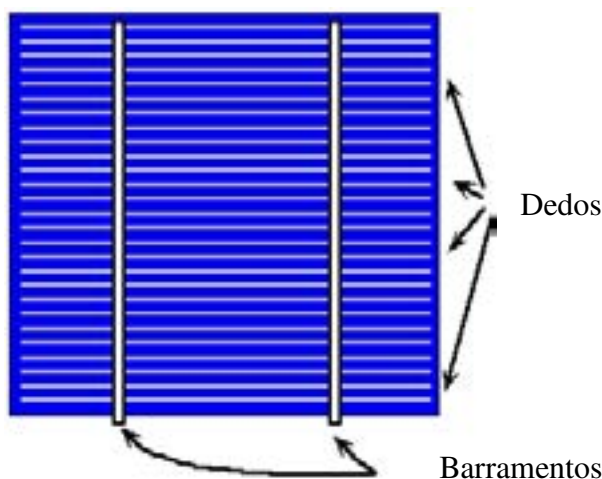


Figura 7: Barramentos e Dedos de Células Solares [11]

Através das modificações dos três parâmetros (contatos, barramento e dedos) e a utilização de diversos materiais, foi possível atingir um nível de evolução, em termos de eficiência, conforme apresentado na tabela 2:

Tabela 2: Evolução da Eficiência em Células Fotovoltaicas

Célula	Início		Atual	
	Ano	η (%)	Ano	η (%)
Silício Monocristalino	1941	1	2021	26,7
Silício Policristalino	1977	14	2021	23,3
GaAs	1977	22	2021	27,8
Multijunção	2003	32	2021	39,5
Multijunção (4 ou mais junções)	2013	38,8	2021	39,2
CIGS	1976	6	2021	23,4
aSi	1976	1	2021	14
CdTe	1976	9	2021	22,1
Perovskite	2013	13	2021	25,7
Perovskite/Si Tandem	2017	23,5	2021	29,8
Dye sensitised	1991	6	2021	13
Orgânica	2001	3	2021	18,2
Células de pontos quânticos	2010	3,5	2021	18,1

Fonte: [Best Research-Cell Efficiency Chart | Photovoltaic Research | NREL](#)[12]

2.2 ESTRUTURAS DOS MÓDULOS TEG

O desempenho de um módulo TEG, em sistemas híbridos, é extremamente dependente da geometria. Os elementos pertencentes à geometria são: [13-14]

2.2.1 Comprimento do termoelementos (pernas): O comprimento dos termoelementos é um dos parâmetros críticos no projeto dos sistemas híbridos. Devido à maior temperatura e resistência dos elementos termoelétricos do que de outros componentes, a queda de temperatura através dos termoelementos é mais significativa. Quando temos o aumento do comprimento dos termoelementos e, conseqüentemente, do gradiente de temperatura ao longo do TEG, a potência de saída aumenta. A tendência de variação da potência de saída pela célula fotovoltaica é oposta. Quando o comprimento dos termoelementos aumenta, a resistência térmica global do sistema híbrido também aumenta. Portanto, a fim de aumentar a concentração solar sobre o sistema híbrido, devem ser usados TEGs com pernas mais curtas [13-14]. No entanto, o comprimento ideal dos termoelementos é limitado ao valor da resistência de contato entre os elementos da TEG [15].

2.2.2 Fator de preenchimento e área da seção transversal dos elementos: A área da seção transversal dos elementos e o fator de preenchimento do TEG têm relevância no processo de geração de energia pelo TEG em sistemas autônomos e híbridos [16]. Foi encontrado um número reduzido de pesquisas considerando o efeito de diferentes fatores de preenchimento para o TEG. A maioria deles investiga o impacto da área da seção transversal dos termoelementos. Em Shittu et al. [17] são apresentadas nove configurações geométricas diferentes. Diante da análise das diversas configurações geométricas, foi constatado que os TEGs com menor comprimento e maior área de seção transversal são mais apropriados para serem usados no sistema híbrido, a fim de obter maior potência de saída do sistema. O impacto da área transversal do TEG em um sistema híbrido é apresentado por Li et al. [18]. A análise da área transversal foi através de uma abordagem numérica. Os resultados indicam que a eficiência global do sistema híbrido é maior quando, a área da seção transversal aumenta [19].

2.2.3. Efeito dos substratos: Em um módulo TEG, o substrato atua como material de isolamento elétrico e base para os materiais semicondutores do tipo n e p. Embora a cerâmica seja um isolante apropriado entre módulos elétricos internos, mas depende da aplicação, outros materiais também podem ser utilizados como substrato. Não só o material do substrato, mas também a área do substrato afeta o desempenho do TEG [19].

2.2.4. Efeito da forma: Existem vários formatos de pernas para geradores termoelétricos. A forma pode ser simétrica ou assimétrica. O formato convencional das pernas, principalmente dos sistemas comerciais, é simétrico, na maioria dos casos é de formato cúbico, mas também pode ser na forma de paralelepípedo. A forma assimétrica, atualmente, tem sido cada vez mais estudada. Existem diversas formas sendo analisadas, tais como: trapézio, trapézio reverso, ampulheta, ampulheta inversa Y, reverso Y, oco retangular, retangular multi-oco [20], triangular, triangular oco, circular, em camadas circulares, em camadas triangulares e em camadas quadradas. [21]. A maioria deles é estudada apenas usando simulação em diferentes softwares como Comsol, Matlab e outros. Em Sisik et al. Foi realizada uma comparação da potência estimada, usando uma simulação para pernas retangulares tradicionais com outros formatos em dois materiais: telureto de bismuto e germânio e silício. Os resultados mostram um aumento na geração de energia em quase 100% para formatos trapezoidais e ampulhetas, e 75% para retangulares ocos no caso de telureto de bismuto [20]. O aumento é superior a 100% para trapezoidais e ampulhetas, e 140% para retangulares ocos em caixas de silício-germânio [20]. Mijangos et al. mostra que os módulos termoelétricos assimétricos têm a figura do mérito quase duas vezes superior à tradicional [22]. Já Thimont e LeBlanc descobriram que o módulo com pernas triangulares tem potência gerada superior aos módulos com pernas quadradas e cilíndricas. Isso acontece porque a perna triangular possui uma diferença de temperatura maior e uma resistência

elétrica menor [21].

3 UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS HÍBRIDOS PV/TEG

Podemos utilizar os sistemas híbridos com a concentração de a luz solar ou não. Os casos apresentados a seguir serão de sistemas que não utilizaram sistemas de concentração de luz solar, sendo o gerador termoelétrico aplicado diretamente na parte traseira da célula fotoelétrica.

É importante destacar que as condições climáticas, posicionamento global (latitude e longitude), número de horas de incidência solar e época do ano, são fatores que influenciam diretamente no desempenho do sistema híbrido. Muitos modelos analíticos, não consideram esses critérios bem como as perdas térmicas, a velocidade do vento e temperatura ambiente. Como já foi ressaltado, o sistema híbrido PV/TEG aumenta a energia térmica do módulo e diminui a eficiência da célula fotovoltaica. Em Bjork e Nielsen [23] foram testados quatro tipos de células fotovoltaicas e dependendo do material da célula, a eficiência de conversão do sistema híbrido é geralmente inferior ao do PV sozinho. Esta situação poderá ser modificada se o módulo termoelétrico tenha um alto coeficiente Seebeck. Como a taxa de perda de calor é maior em painéis fotovoltaicos com menor eficiência de conversão a aplicação de TEG neste tipo de células solares torna-se mais eficaz para aumentar a eficiência total do módulo [23].

Para exemplificar a utilização de sistemas híbridos, será apresentado um estudo realizado por Rezânia et Al [24] em três cidades da Europa. Também foi considerado que o modelo térmico do painel fotovoltaico e do híbrido PV/TEG inclui convecção forçada devido ao vento, convecção natural e transferência de calor irradiada entre os painéis e o ambiente. As cidades escolhidas foram Aalborg (Dinamarca), Paris (França) e Málaga (Espanha). Também vale destacar que o TEG está termicamente acoplada ao painel e portanto está sendo considerado o efeito da resistência do TEG no desempenho do painel fotovoltaico[24].

Antes de apresentar os resultados obtidos, a figura 8 apresenta os dois sistemas testados. Na figura 8a temos somente a placa fotovoltaica e na figura 8b temos a TEG acoplada na parte traseira da placa.

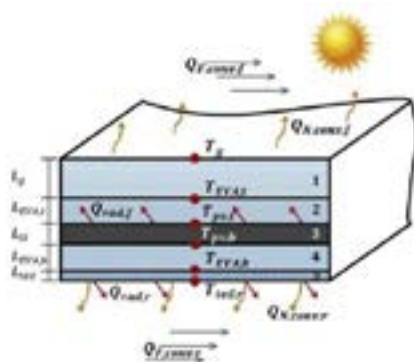


Figura 8a – PV [24]

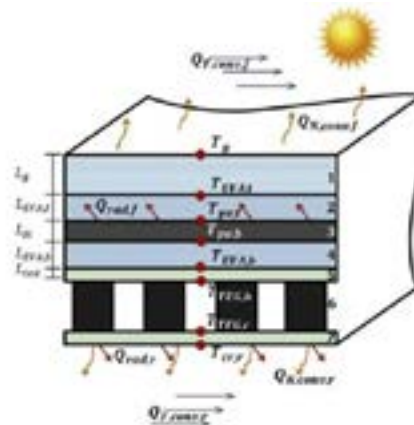


Figura 8b – PV/TEG [24]

Segundo Rezânia et al [24], as condições do estudo realizado levaram em consideração a irradiação solar, temperatura ambiente e velocidade do vento. A geração de energia aumenta quando a energia solar e a irradiação aumentam. A temperatura ambiente e a velocidade do vento também afetam o sistema PV/TEG. Em uma temperatura ambiente mais baixa e maior velocidade do vento, o painel PV/TEG opera com maior eficácia. De acordo com [25-26], uma maior velocidade do vento

causa um maior coeficiente de transferência de calor na superfície do módulo, voltado para o ambiente, e melhora a transferência de calor convectiva da superfície. Este fator reduz a temperatura do PV e o torna mais eficiente. Além disso, uma menor temperatura ambiente reduz a resistência térmica geral do módulo híbrido PV/TEG. Eventualmente, a temperatura da superfície do PV diminui e a eficiência do painel melhora. Portanto, o efeito desses parâmetros precisa ser considerado para modelagem do circuito térmico PV/TEG. A figura 9 apresenta a variação do rendimento do sistema PV/TEG ($\eta_{PV/TEG}$), para uma faixa de velocidade do vento (V) e temperatura ambiente (T_a).

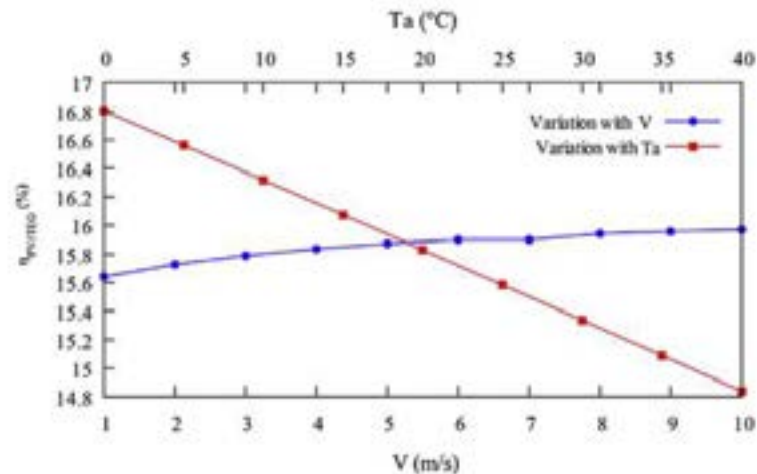


Figura 9: Relação entre o Rendimento do PV/TEG ($\eta_{PV/TEG}$), velocidade do vento (V) e temperatura ambiente (T_a) [24]

Segundo análise de Rezânia et al [24] o painel PV/TEG apresenta maior eficiência quando a temperatura ambiente é baixa, principalmente em estações frias, embora a radiação solar seja mais intensa nas estações quentes em comparação com as estações frias. A velocidade do vento também afeta a maior eficiência do painel integrado nas estações frias. A Figura 10 ilustra que o painel híbrido tem melhor desempenho, nas cidades do norte da Europa onde a temperatura é relativamente mais baixa e a velocidade do vento é mais alta.

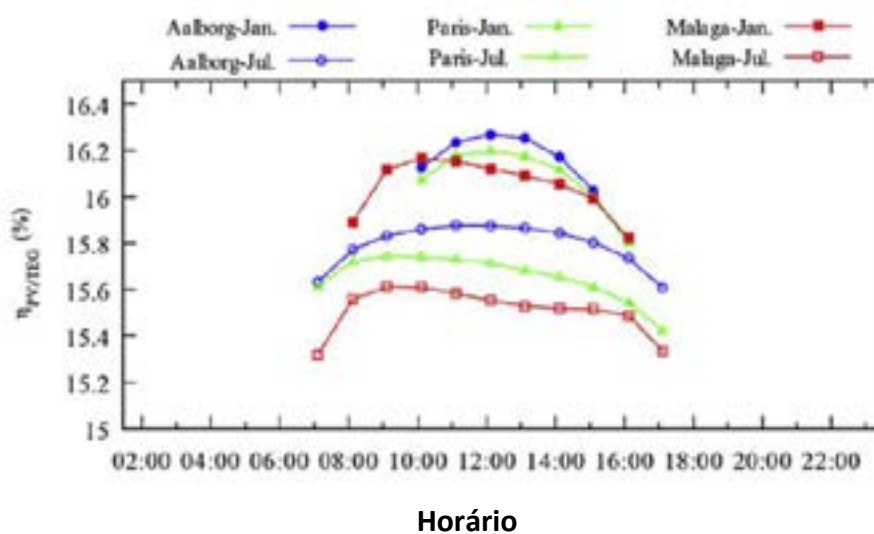


Figura 10: Variação do $\eta_{PV/TEG}$ para as três cidades da Europa [24].

Segundo os autores [24], a geração de energia pelo TEG é fortemente afetada pela diferença de temperatura nas junções frias e quentes do TEG. Essa diferença de temperatura aumenta com a irradiação solar, já que uma maior irradiação solar aumenta a temperatura da placa (T_{PV}) e também a temperatura do módulo (T_{TEG}). Como a diferença de temperatura é pequena, a energia gerada pelo TEG não é comparável à geração de energia pelo painel fotovoltaico e a TEG tem um pequeno impacto no desempenho da potência do sistema híbrido ($P_{PV/TEG}$). Na pesquisa realizada, a geração de energia adicional da TEG não é comparável com a energia gerada pela placa fotovoltaica. A potência da TEG (P_{TEG}), no modelo PV/TEG, pode ser melhorado utilizando materiais termoelétricos com ZT mais altos e otimização da geometria da TEG[24]. A figura 11 apresenta a P_{TEG} :

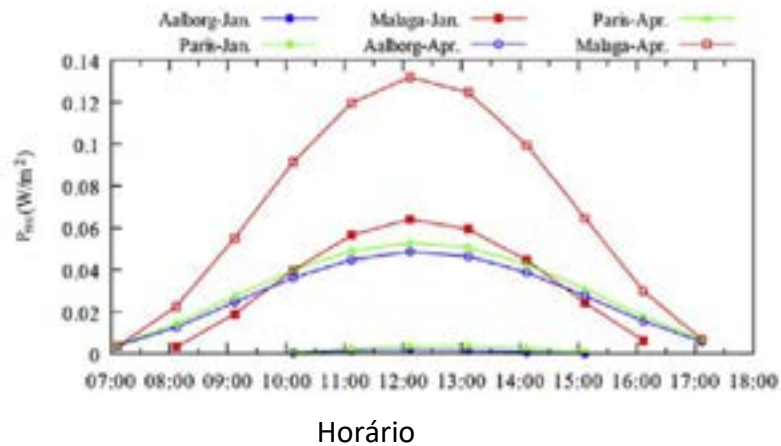


Figura 11: Variação diária da P_{TEG} nas três cidades da Europa [24]

Para ter uma estimativa da geração total anual de energia pelo modelo híbrido, a figura 12 mostra que $P_{PV/TEG}$ tem um grande potencial nas cidades do sul da Europa (Málaga) em comparação com as cidades do norte (Paris e Aalborg). Este estudo revela que, com consideração das perdas térmicas reais e das condições climáticas em modelagem do PV/TEG, o painel híbrido produz máxima energia durante a primavera nas cidades do norte e têm potência máxima nas cidades do Sul durante a temporada de verão. O nível de geração de energia é quase igual na primavera e temporadas de verão na Europa Central [24].

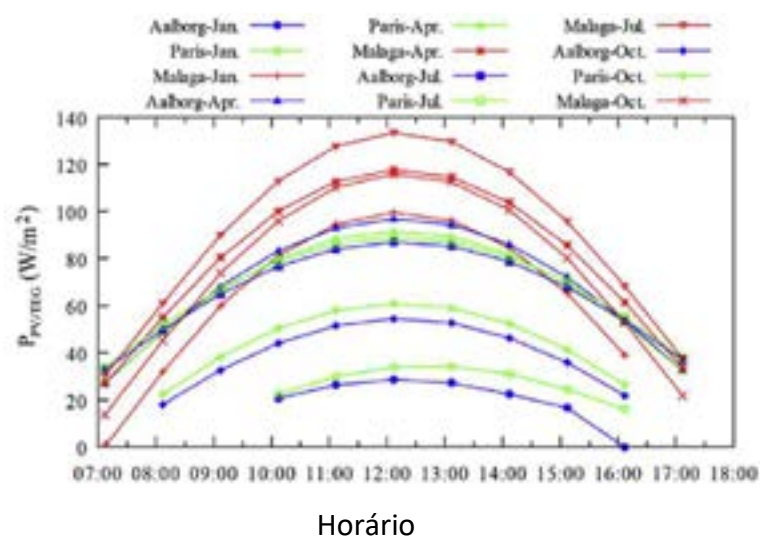


Figura 12: Variação diária da $P_{PV/TEG}$ nas três cidades da Europa [24]

4 CONCLUSÕES

A utilização de sistemas híbridos PV/TEG mostra-se uma boa possibilidade de cogeração de energia, desde que sejam observadas algumas orientações relativo às estruturas da PV/TEG, a geometria da TEG e os seus parâmetros térmicos e elétricos. Destacam-se os seguintes pontos:

- Devem ser utilizados geradores termoelétricos com alto ZT;
- O formato das pernas dos geradores termoelétricos devem ser assimétricas e os seus comprimentos devem ser adaptados às aplicações;
- A distribuição uniforme da temperatura aumenta a eletricidade gerada por ambos os componentes e aumenta a vida útil das células fotovoltaicas;
- A conectividade elétrica entre o PV e a TEG deve ser otimizada para reduzir as perdas;
- A maioria dos estudos publicados são realizados em ambientes de simulação. É necessário, realizar experiências em condições reais, para ver quais outros problemas podem surgir e para encontrar as melhores soluções para melhorias dos sistemas híbridos e até mesmo para simulação levando em consideração os problemas descobertos;
- Em relação a utilização do sistema PV/TEG, na aplicação apresentada, foi utilizado um modelo realista e termicamente acoplado, desenvolvido para prever desempenho do painel híbrido PV/TEG.
- As condições ambientais de três cidades da amostra na Europa são importantes na avaliação do painel híbrido. O efeito da convecção, convecção forçada e radiação foram consideradas na aplicação. O modelo apresenta variação diária da potência híbrida de geração, a geração de energia termoelétrica e fotovoltaica e temperatura dos painéis PV e PV/TEG.
- Os resultados mostram que para os materiais termoelétricos atuais com $ZT \sim 1$, embora a eficiência do PV/TEG seja ligeiramente superior à eficiência do painel fotovoltaico sozinho, o TEG tem pequeno impacto na potência geração do $P_{PV/TEG}$. Além disso, a perda de calor irradiada da superfície frontal e o calor convectivo da perda, devido à velocidade do vento são preponderantes na perda de calor das superfícies do painel.
- O painel híbrido produz potência máxima durante a primavera no Norte da Europa, ao mesmo tempo em que proporciona o máximo durante o verão para o sul da Europa. Além disso, a eficiência do painel PV/TEG é maior no Norte da Europa, onde a temperatura ambiente é mais baixa e a velocidade do vento é mais alta.

Referências

- [1] REIS L. B, CUNHA E. C. N, Energia Elétrica e Sustentabilidade: Manole, São Paulo, 2006.
- [2] COTFAS D.T, COTFAS P.A, MAHMOUDINEZHAD,S, LOUZAZNI M, Crytical factors and parameters for hybrid Photovoltaic-Thermoelectric systems; review, Applied Thermal Engineering 215 (2022),Article 118977.
- [3] ANDO JUNIOR O. H, MARAN A.L.O, HENAO N. C; SILVA E. A, SCHAEFFER L, Use of Seebeck Effect for Energy Harvesting. IEEE Latin American Transactions, Vol.14, N° 9, Setembro de 2013
- [4] ROSS, RGJ. Interface design considerations for terrestrial solar cell modules. In: Photovoltaic Specialist Conference 1976; 1976. pages 801-806
- [5] ROSS, RGJ. Flat-plate photovoltaic array interface design optimization. In: Proc. 14th IEEE Photovoltaic Specialist Conference 1980; 1980. pages 1126-1132
- [6] <https://ae-solar.com/history-of-solar-module/> Acesso em 15/07/23
- [7] <http://taiyangnews.info/technology/simply-bifacial/> Acesso em 12/08/23
- [8] <https://solarmagazine.com/solar-panels/maxeon-solar-cells/> Acesso em 26/08/23
- [9] [Sharp Develops Concentrator Solar Cell with World's Highest Conversion Efficiency of 43.5% | Press Releases | Sharp Global](#) Acesso em 26/08/23
- [10] PATERNOSTER G, Silicon Concentrator Solar Cells: Fabrication, Characterization and Development of Innovatite Designs, PhD Tesis (2013).
- [11] <https://pt.dsisolar.com/info/solar-cell-busbars-fingers-tab-wires-and-bus-39886370.html> Acesso em 04/09/23
- [12] [Best Research-Cell Efficiency Chart | Photovoltaic Research | NREL](#) Acesso em 04/09/23
- [13] LIU Z, ZHU S, GE Y, SHAN F, ZENG L, LIU W, Geometry optimization of two-stage thermoelectric generators using simplified conjugate-gradient method, Appl. Energy 190 (2017), pages 540–552.
- [14] MAHMOUDINEZHAD S, AHMADI ATHOUJEI S, COTFAS P. A, COTFAS D. T, ROSENDAHL L. A, REZANIA A, Experimental and numerical study on the transient behavior of multi junction solar cell-thermoelectric generator hybrid system, Energy Conversion and Management 184 (2019), pages 448-455.
- [15] GRD, Thermoelectrics-handbook of thermoelectric, CRC Press, 1999.
- [16] CONTENTO G, LORENZI B, Rizzo A, NARDUCCI D, Efficiency enhancement of a-Si and CZTS solar cells using different thermoelectric hybridization strategies, Energy 131 (2017), pages 230–238.
- [17] SHITTU S, LI G, ZHAO X, MA X, Series of detail comparison and optimization of thermoelectric element geometry considering the PV effect, Renew. Energy 130 (2019), pages 930–942.
- [18] LI G, CHEN X, JIN Y, Analysis of the primary constraint conditions of an efficient photovoltaic-thermoelectric hybrid system, Energies 10 (2017), pages 1–12.
- [19] CHEN W.H, WANG C.C, HUNG C.I, YANG C.C, JUANG R.C., Modeling and simulation for the design of thermal-concentrated solar thermoelectric generator, Energy 64 (2014), pages 287–297.
- [20] SISIK B, LEBLANC S, The Influence of Leg Shape on Thermoelectric Performance Under Constant Temperature and Heat Flux Boundary Conditions, Front. Mater. 7 (2020), pages 1–13.
- [21] THIMONT Y, LEBLANC S, The impact of thermoelectric leg geometries on thermal resistance and power output, J. Appl. Phys. 126 (2019), article 095107.
- [22] MIJANGOS A.F, QUINTANA J.A., Thermoelectric Devices: Influence of the Legs Geometry and Parasitic Contact Resistances on ZT, Chapter 6, from Patricia Aranguren, Bringing Thermoelectricity into Reality, IntechOpen, 2018.
- [23] BJORK R, NIELSEN K. K,The performance of a combined solar photovoltaic (PV) and thermoelectric generator (TEG) system, Solar Energy, vol 120 (2015) , pages 187-194.
- [24] REZANIA A, SERA D., ROSENDAHL L.A., Coupled thermal model of photovoltaic thermoelectric hybrid panel for sample cities in Europe, Renewable Energy 99 (2016), pages 127–135.
- [25] VOROBIEV Y, GONZALEZ-HERNANDEZ J, VOROBIEV P, BULATL L, Thermal-photovoltaic solar hybrid system for efficient solar energy conversion, Sol. Energy 80 (2006), pages 170-176.
- [26] [4] ZHANG X, CHAU K.T., An automotive thermoelectric-photovoltaic hybrid energy system using maximum power point tracking, Energy Convers. Manag. 52 (2011), pages 641-647.



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil

26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de

Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming

Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis

12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

METODOLOGIA DE PREDIÇÃO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE DADOS HISTÓRICOS REAIS DE GERAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE

METHODOLOGY FOR PREDICTING ELECTRICITY GENERATION BASED ON REAL HISTORICAL GENERATION DATA FROM A GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEM

André Possamai Rosso ⁽¹⁾

Giuliano Arns Rampinelli ⁽²⁾

Lirio Schaeffer ⁽³⁾

RESUMO

A inserção da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica apresenta alguns desafios a serem superados. Esses estão relacionados, principalmente, à natureza intermitente da geração de energia elétrica de sistemas e usinas fotovoltaicas e, por consequência, a geração de energia elétrica de sistemas fotovoltaicos pode sofrer flutuações de geração. Devido a essas flutuações, o desenvolvimento de previsões de geração com sistemas fotovoltaicos se tornará indispensável. Analisando a importância das previsões de geração, o presente trabalho tem como finalidade apresentar uma metodologia de previsão de geração fotovoltaica de curto prazo (RRS). A metodologia de previsão desenvolvida precisa como entradas de dois blocos de dados de natureza diferente: o primeiro conjunto é os dados históricos reais de geração de um sistema fotovoltaico no local que se deseja efetuar a previsão e o segundo são os dados de previsão do tempo de uma plataforma de previsão de tempo meteorológico. O Horizonte de Resolução Temporal utilizado no trabalho é de 1h até 10h futuras. As métricas utilizadas para a avaliação de desempenho do método proposto são: RSME, MAE e MAPE. Utilizando a plataforma Ventusky, o RMSE médio anual para o perfil ensolarado, utilizando o método RRS, foi de 15,7%. Utilizando a plataforma *Open Weather*, o RMSE médio anual para o perfil ensolarado, utilizando o método RRS, foi de 10,2%. Utilizando a plataforma *Ventusky*, o perfil

intermediário obteve RMSE médio anual de 25,0% com o método RRS e, com o perfil chuvoso/nublado, o método RRS obteve um RMSE médio anual de 10,0%. Utilizando a plataforma *Open Weather*, o perfil intermediário obteve RMSE médio anual de 21,1% com o método RRS e, com o perfil chuvoso/nublado, o método RRS obteve um RMSE médio anual de 28,0%.

Palavras-chave: Predição de geração através de sistemas fotovoltaicos. Método de predição fotovoltaica. Métricas estatísticas.

The inclusion of photovoltaic solar energy in the electricity matrix presents some challenges to be overcome. These are mainly related to the intermittent nature of electricity generation from photovoltaic systems and plants and, as a result, electricity generation from photovoltaic systems can suffer from fluctuations in generation. Due to these fluctuations, the development of generation predictions with photovoltaic systems will become indispensable. In view of the importance of generation predictions, the purpose of this paper is to present a methodology for predicting short-term photovoltaic generation (RRS). The prediction methodology developed requires two different sets of data as inputs: the first set is the actual historical generation data of a photovoltaic system at the location where the prediction is to be made, and the second is weather forecast data from a meteorological weather forecasting platform. The Time Resolution Horizon used in the work is from 1h to 10h in the future. The metrics used to evaluate the performance of the proposed method are: RSME, MAE and MAPE. Using the Ventusky platform, the average annual RMSE for the sunny profile using the RRS method was 15.7%. Using the Open Weather platform, the average annual RMSE for the sunny profile, using the RRS method, was 10.2%. Using the Ventusky platform, the intermediate profile obtained an average annual RMSE of 25.0% with the RRS method and, with the rainy/cloudy profile, the RRS method obtained an average annual RMSE of 10.0%. Using the Open Weather platform, the intermediate profile obtained an average annual RMSE of 21.1% with the RRS method and, with the rainy/cloudy profile, the RRS method obtained an average annual RMSE of 28.0%.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas fotovoltaicos que convertem diretamente a irradiação solar em eletricidade podem ser usados em uma ampla área de aplicações. Os SFVs utilizados vão desde pequenos sistemas que alimentam cargas até grandes sistemas que alimentam diretamente a rede elétrica. O componente principal dos SFVs são os arranjos fotovoltaicos. Esses são um conjunto de módulos interligados em série e em paralelo que totalizam a capacidade de energia necessária do sistema [1].

Devido à radiação solar ser intermitente e poder variar durante um curto período de tempo, a produção de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos pode sofrer flutuações na geração de energia. As incertezas na produção de energia dificultam o despacho da energia elétrica produzida na rede elétrica. Embora o armazenamento da energia elétrica fotovoltaica seja uma solução para esse problema, é necessária uma predição precisa da energia solar fotovoltaica produzida para o controle de energia injetada na rede elétrica [2] e [3].

Com o aumento do uso da energia solar fotovoltaica para a geração de eletricidade, tem-se a importância de realizar estudos da predição da radiação solar no local onde os sistemas fotovoltaicos serão instalados. A partir do conhecimento do perfil/comportamento da irradiância solar, pode-se viabilizar a instalação de sistemas fotovoltaicos em uma determinada região, garantindo o máximo aproveitamento do recurso ao longo de todo o ano, onde as variações da intensidade da radiação solar sofrem significativas alterações [4], [5] e [6].

A integração fotovoltaica na matriz elétrica ainda apresenta alguns desafios que precisam ser superados. Esses estão relacionados, principalmente, à natureza intermitente da produção fotovoltaica. A partir do momento que a geração fotovoltaica atinge uma parcela significativa na matriz elétrica, o desenvolvimento de predições de geração fotovoltaica em grande escala se tornará indispensável [3] e [7].

Analisando a importância do estudo de predições de geração fotovoltaica, o presente artigo tem como objetivo, apresentar um método de predição de geração fotovoltaica (RRS) a partir dos dados de geração de um sistema fotovoltaico conectado à rede e dos dados de previsão do tempo utilizando

as plataformas *Ventusky* e *OpenWeather* e comparar o método proposto com o método da persistência (MP). O Horizonte de Resolução Temporal utilizado no trabalho é de 1h até 10h futuras.

2. METODOLOGIA

A metodologia proposta se baseia em uma relação com uma plataforma de previsão do tempo meteorológica junto com os dados de geração fotovoltaica do local que se deseja realizar a previsão. O método foi desenvolvido no SFGD da UFSC, Campus Araranguá. Esta seção faz referência a metodologia de previsão de geração fotovoltaica a partir de duas plataformas de previsão do tempo (*Ventusky* e *OpenWeather*) e dos dados de geração de um sistema fotovoltaico conectado à rede.

2.1 Plataforma *Ventusky*

A plataforma *Ventusky* foi desenvolvida na empresa InMeteo. Na plataforma *Ventusky*, as previsões do tempo são extraídas todos os dias. No dia de busca a previsão é extraída no horário das 06:00h até as 18:00h.

2.2 Plataforma *Open Weather*

A *Open Weather* é composta por uma equipe de especialistas em TI e cientistas de dados que pratica ciência de dados meteorológicos profundos. Para cada ponto do globo terrestre, o *Open Weather* fornece dados meteorológicos históricos, atuais e previstos por meio de APIs de velocidade da luz. A plataforma apresenta os percentuais de probabilidade de chuva, temperatura e velocidade do vento. Além disso, a plataforma também apresenta o perfil da curva de temperatura durante os intervalos horários.

2.3 Sistema Fotovoltaico da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Araranguá-SC

O sistema fotovoltaico da UFSC – Campus Araranguá é composto por 3 módulos fotovoltaicos de modelo 330PHK-36 do fabricante BYD com potência nominal individual de 330 Wp e 1 inversor de modelo PHB1500-NS do fabricante PHB Solar com potência nominal de 1,5 kW. A potência nominal do sistema é de 0,99 kWp.

O arranjo fotovoltaico está instalado no telhado da planta piloto bioclimática localizada no Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde (CTS) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) no município de Araranguá – SC. Os dados do sistema estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Especificações do Sistema Fotovoltaico da UFSC – Campus Araranguá – SC.

Potência Nominal do Sistema	0,99 kWp
Arranjo Fotovoltaico	1 <i>string</i> - 3 módulos
Ângulo de inclinação	20 °
Desvio Azimutal (orientação dos módulos)	0 ° N
Fabricante dos módulos/Modelo	BYD/330PHK-36
Potência unitária dos módulos	330 Wp
Inversor	1x PHB1500-NS
Potência nominal do inversor	1,5 kW

2.4 Obtenção do valor padrão final (PF) de predição para diferentes previsões do tempo utilizando a plataforma *Ventusky*

A partir das curvas de geração (Figura 1) e das previsões do tempo obtidas por meio da plataforma *Ventusky*, um valor PF de predição foi obtido para cada intervalo (horário) entre as 6h até as 18h. O valor horário do PF também foi obtido para cada mês do ano. O primeiro valor PF de predição encontrado foi para todos os meses do ano com a previsão de dias ensolarados (céu limpo). Os outros valores de PF com previsões de dias diferentes foram obtidos da mesma maneira dos dias ensolarados. A partir da curva de geração ensolarada de cada mês do ano, a geração foi integrada para cada intervalo horário, incluindo das 6h até as 18h. As curvas de geração para as previsões de chuvas e trovoadas não foram obtidas devido ao fato de não se ter um dia completo com essa previsão no ano de 2022.

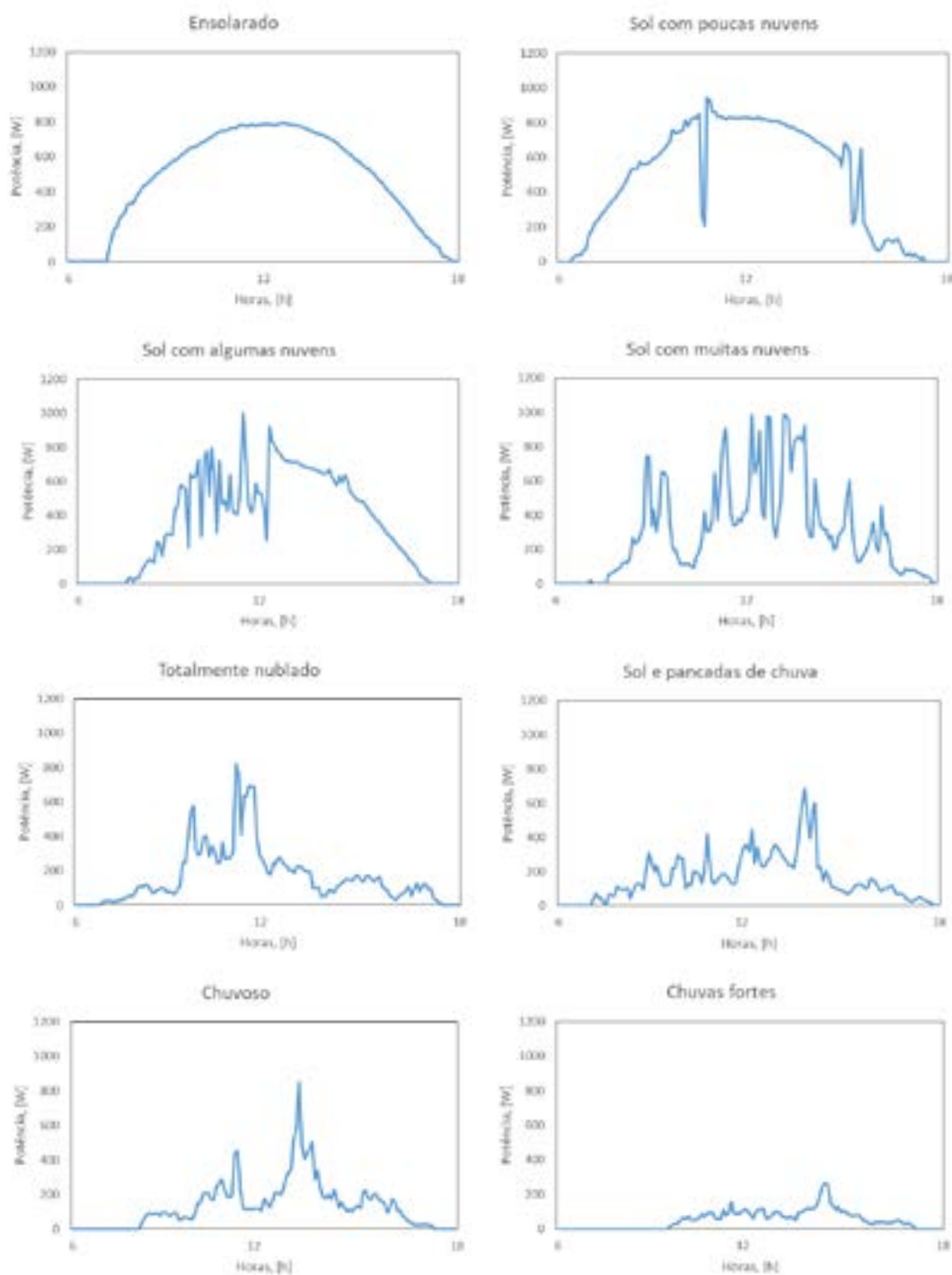


Figura 1: Curvas de Potência Fotovoltaica do Sistema Fotovoltaico da UFSC, Araranguá.

A Figura 2 apresenta o diagrama representativo dos passos para se obter o valor do PF de predição.

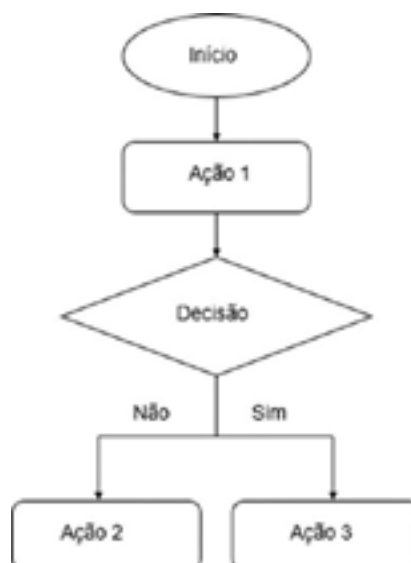


Figura 2: Fluxograma para obtenção do valor padrão final de predição para cada mês do ano e para cada previsão do tempo.

Ação 1: levantar os valores de geração fotovoltaica no intervalo horário para todos os dias ensolarados em todos os meses do ano.

Decisão: por meio dos valores de geração fotovoltaica levantados, existe um conjunto de valores capaz de realizar um descarte dos valores discrepantes e levantar uma média dos outros valores para se obter um valor padrão final?

Ação 2: realizar a obtenção do valor padrão final por meio daquele(s) valor(es) encontrado(s).

Ação 3: através dos valores obtidos, realizar uma curva e descartar os valores discrepantes. Com os outros valores, achar um valor padrão preliminar que represente a maioria daqueles valores. Para obtenção do valor PF, considerar uma média dos valores que estão em uma margem de 5% para cima ou para baixo do valor padrão preliminar. Por meio dessa média, obtém-se o valor PF para cada intervalo horário de cada mês.

2.5 Levantamento dos perfis utilizados para realizar a predição de geração RRS utilizando as plataformas *Ventusky* e *Open Weather*

Devido às plataformas de previsão do tempo possuírem uma legenda muito ampla para cada tipo de dia, foram divididos em 3 perfis os tipos de previsões do tempo das plataformas *Ventusky* e *Open Weather* (Tabela 2).

Tabela 2: Perfis de previsões do tempo obtidos das plataformas *Ventusky* e *Open Weather*.

PERFIS	TIPOS DE PREVISÕES VENTUSKY
Ensolarado	ensolarado, sol com poucas nuvens, sol com algumas nuvens e sol e cirrus
Intermediário	sol com muitas nuvens, sol e pancadas de chuva e totalmente nublado
Chuvoso/nublado	chuvoso, chuvas e trovoadas e chuvas fortes
PERFIS	TIPOS DE PREVISÕES OPEN WEATHER
Ensolarado	céu limpo, poucas nuvens e nuvens dispersas
Intermediário	nuvens encobertas e nuvens quebradas
Chuvoso/nublado	chuva leve, chuva moderada e chuva forte

Através dos perfis apresentados na Tabela 2, foi obtido um novo padrão final de perfil (PFP) para cada perfil e por meio desse PFP se obtêm as previsões de geração fotovoltaica para cada perfil. O PFP foi obtido através de uma média do PF dos tipos de previsões de cada perfil. As previsões de geração fotovoltaica para a cidade de Araranguá-SC foram realizadas por meio de cada perfil, utilizando as plataformas *Ventusky* e *Open Weather*.

2.6 Horizonte de Resolução Temporal (HRT)

O horizonte de resolução temporal que está sendo utilizado no trabalho é de predição de prazo curto. O horizonte de prazo curto pode variar de 1 minuto até 24 horas. No presente estudo, está sendo adotado um horizonte de predição do dia (1h até 10h futuras).

2.7 Métricas estatísticas para avaliação do desempenho do método proposto

Segundo [2], o desempenho de um modelo de previsão é frequentemente avaliado pelos erro quadrático médio (RMSE), erro médio quadrático normalizado (nRMSE) ou erro médio quadrático relativo (rRMSE), erro médio absoluto (MAE) ou erro médio de polarização (MBE), entre outros meios.

A Agência Internacional de Energia (IEA, 2013) afirma que as principais métricas utilizadas são: raiz do erro médio quadrático (RMSE), erro médio absoluto (MAE) e erro médio (MBE). Cada métrica possui suas características particulares que podem determinar com maior ou melhor qualidade os erros. O autor de [8] realizou uma revisão detalhada sobre as principais métricas estatísticas utilizadas para previsões de radiação solar. As métricas utilizadas no trabalho são apresentadas nas equações 1, 2 e 3.

$$RMSE [\%] = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (G_R - P)^2}}{\bar{G}_R} \cdot 100 \quad (1)$$

$$MAE [\%] = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |G_R - P|}{\bar{G}_R} \cdot 100 \quad (2)$$

$$MAE [\%] = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |G_R - P|}{\bar{G}_R} \cdot 100 \quad (3)$$

em que:

G_R = geração real;

P = geração predita;

\bar{G}_R = geração real média

Os erros utilizados no trabalho foram calculados em percentuais. O RMSE foi obtido em intervalos horários das 8 h até 18 h para os três perfis, utilizando as plataformas *Ventusky* e *Open Weather*. Foram obtidos erros médios anuais para os três perfis, utilizando RMSE, MAE e MAPE. O erro médio mensal foi obtido utilizando RMSE, MAE e MAPE para todos os meses do intervalo analisado.

2.8 Método da Persistência (MP)

Os MP são métodos mais simples de elaborar previsões e usados como referência para modelos mais desenvolvidos. O MP clássico assume que as condições (irradiância solar, geração, índice de céu claro etc.) permaneçam as mesmas entre o tempo atual t e $t + f_n$. O modelo da

persistência é recomendado quando as séries temporais são estacionárias [9]. A predição de geração em um instante t é dada pela Equação (2.1):

$$Pp(t + f_h) = P(t) \quad (4)$$

Os MPs possuem algumas características que são desejáveis, entre elas: (i) simplicidade, método que não requer nenhum treinamento ou inteligência; (ii) rapidez, método computacional rápido de implementar e fácil de operar; e (iii) repetitividade, método que sempre produz um resultado esperado para uma mesma entrada [10].

3. RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir do método apresentado, bem como discussões relevantes acerca deles.

3.1 Erros médios da predição de geração fotovoltaica anual

O RMSE (%) médio anual foi obtido para os três perfis. A Tabela 3 apresenta os valores obtidos. Observando a Tabela 3, percebe-se que o menor RMSE médio foi para o perfil Chuvoso/nublado, 10,0%. Como o perfil Chuvoso/nublado foi o com um número menor de previsões do tempo durante o ano, o valor do padrão final sempre se aproximou do valor real de geração, sendo assim o RMSE médio deu um valor menor quando comparado com o perfil Ensolarado. Como já esperado, o perfil Intermediário deu um valor maior de RMSE médio, 25,0%. O perfil Intermediário é um perfil com maior desafio para se realizar as predições. Nele, a radiação solar é intermitente devido a um grande acúmulo e passagem de nuvens. Para o perfil Ensolarado, o RMSE médio foi de 15,7%. Comparando o RRS com o MP para todos os perfis, o método RRS obteve erros relativamente menores que os do MP.

Tabela 3: Erro médio diário anual RSME, MAE e MAPE para os três perfis utilizando a plataforma *Ventusky*.

PERFIS	RMSE (%)	MAE (%)	MAPE(%)	RMSE (%)	MAE (%)	MAPE (%)
	RRS	RRS	RRS	MP	MP	MP
Ensolarado	15,7	9,7	11,9	20,4	15,5	15,7
Intermediário	25,0	19,4	19,7	47,8	37,2	44,7
Chuvoso/ nublado	10,0	8,3	8,7	85,6	63,5	78,5

O RMSE (%) médio anual também foi obtido para os três perfis utilizando a plataforma *Open Weather*. A Tabela 4 apresenta os valores obtidos. Observando a Tabela 4, percebe-se que o menor RMSE médio foi para o perfil ensolarado, 10,2%. O perfil Chuvoso/nublado apresentou um valor maior de RMSE médio, 28,0%. Os perfis Chuvoso/nublado e Intermediário são os com maior desafio para se realizar as predições. Para o perfil Intermediário, o RMSE médio foi de 21,1%. Comparando o RRS com o MP para todos os perfis, o método RRS obteve erros relativamente menores que os do MP.

Tabela 4: Erro médio diário anual RSME, MAE e MAPE para os três perfis utilizando a plataforma *Open Weather*

PERFIS	RMSE (%)	MAE (%)	MAPE (%)	RMSE (%)	MAE (%)	MAPE (%)
	RRS	RRS	RRS	MP	MP	MP
Ensolarado	10,2	6,2	7,1	23,1	17,0	17,4
Intermediário	21,1	17,0	19,8	21,9	18,3	22,1
Chuvoso/ Nublado	28,0	20,8	22,3	42,2	33,9	45,4

3.2 Erros médios da predição de geração fotovoltaica mensal

Conforme a Tabela 5, percebe-se que o RMSE médio mensal para o método RRS variou entre 7,3% e 50,1%, enquanto para o método MP variou entre 15,1% e 65,0%. Em comparação com o estudo de [11], no mês de janeiro de 2023 o método RRS se mostrou com um desempenho melhor quando comparado com todos os métodos combinados para as três usinas fotovoltaicas nos quatro meses analisados no trabalho de [11]. Muitas dessas diferenças se dão pela predição de geração fotovoltaica de [11] e a RRS serem realizadas em lugares, metodologias e climas diferentes.

Nos meses fevereiro de 2023 e novembro e dezembro de 2022, o método RRS apresentou desempenho parecido com o dos métodos combinados de [11]. Em todos os meses, exceto no mês de abril de 2022, o método RRS se mostrou com um desempenho maior quando comparado com o método MP. O maior RMSE médio mensal com o método RRS foi de 50,1% no mês de abril. Este foi um mês de muita instabilidade meteorológica e a plataforma *Ventusky* apresentou erros de previsão.

Tabela 5: RMSE, MAE e MAPE médio diário mensal para os métodos RRS e MP utilizando a plataforma *Ventusky*.

		RMSE											
		Jan/23	Fev/23	Mar/22	Abr/22	Mai/22	Jun/22	Jul/22	Ago/22	Set/22	Out/22	Nov/22	Dez/22
RRS		7,3	11,8	30,4	50,1	14,7	19,6	20,5	23,3	23,7	24,1	15,7	15,3
MP		15,1	20,4	65,0	42,9	41,2	45,7	39,3	38,9	63,0	36,1	37,3	31,3
		MAE											
		Jan/23	Fev/23	Mar/22	Abr/22	Mai/22	Jun/22	Jul/22	Ago/22	Set/22	Out/22	Nov/22	Dez/22
RRS		5,0	7,9	20,3	38,9	12,3	13,9	14,7	16,3	20,2	17,2	8,9	12,1
MP		12,5	16,7	49,2	37,1	28,1	36,0	31,4	24,8	53,0	27,5	26,2	23,6
		MAPE											
		Jan/23	Fev/23	Mar/22	Abr/22	Mai/22	Jun/22	Jul/22	Ago/22	Set/22	Out/22	Nov/22	Dez/22
RRS		6,1	9,6	27,8	49,4	17,2	23,3	20,3	30,2	28,7	27,6	11,7	16,5
MP		13,1	18,4	64,4	48,8	38,3	66,3	37,4	31,1	86,1	34,8	26,6	26,5

O método RRS apresentou para todos os meses erros MAE e MAPE menores que os do método MP. Para o mês de janeiro, o método RRS apresentou o erro MAPE menor que todos os métodos avaliados por [11] nos meses um e três. No segundo mês, [11] apresentaram MAPE menor que o do método RRS para praticamente todos os métodos, ficando abaixo apenas os métodos FFNN e Persistência.

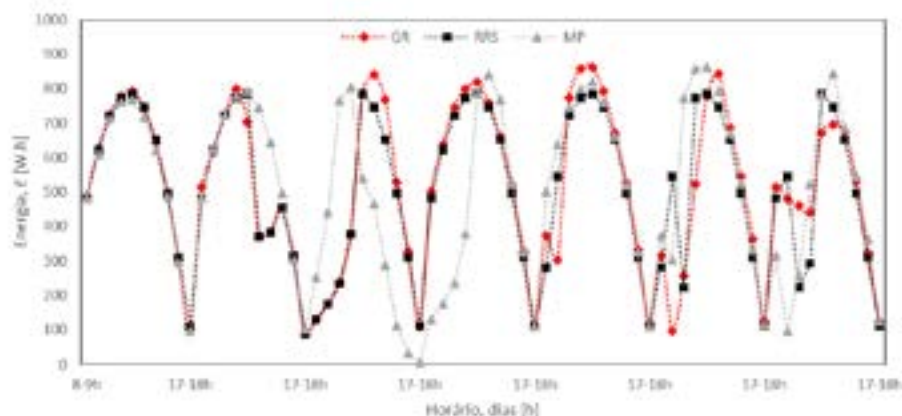
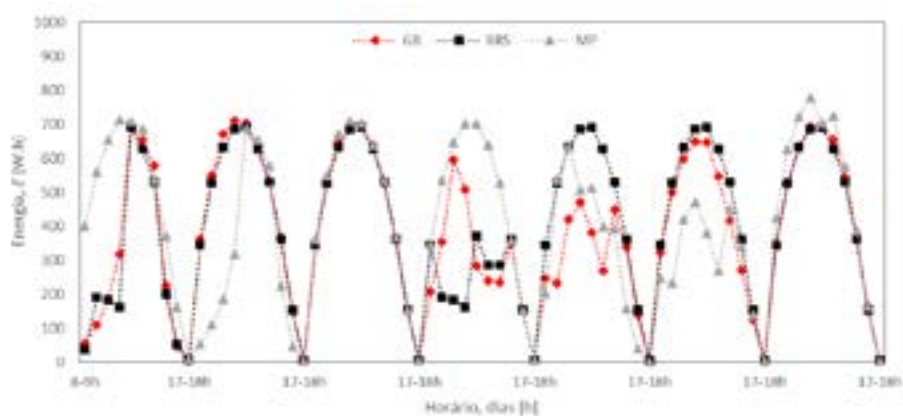
Os dias utilizados para obter os erros RMSE, MAE e MAPE médio mensal por meio da plataforma *Open Weather* foram os mesmos dias utilizados para obter os erros por meio da plataforma *Ventusky*.

Conforme a Tabela 6, percebe-se que o RMSE médio mensal para o método RRS variou entre 13,6% e 38,1%, enquanto para o método MP variou entre 15,1% e 65,0%. Em comparação com o estudo de [11], nos meses de janeiro, fevereiro, maio, junho, julho, agosto e novembro o método RRS se mostrou com um desempenho parecido quando comparado com alguns métodos combinados e não combinados para a Usina 2 no primeiro mês. Em todos os meses do ano, exceto janeiro, o método RRS se mostrou com um desempenho maior quando comparado com o método MP. O maior RMSE médio mensal com o método RRS continuou sendo no mês de abril, 38,1%. Como comentado anteriormente, esse mês foi de muita instabilidade meteorológica e a plataforma *Open Weather* também apresentou erros de previsão.

Tabela 6: RMSE, MAE e MAPE médio diário mensal para os métodos RRS e MP utilizando a plataforma *Open Weather*

RMSE												
	Jan/23	Fev/23	Mar/22	Abr/22	Mai/22	Jun/22	Jul/22	Ago/22	Set/22	Out/22	Nov/22	Dez/22
RRS	16,6	13,6	29,3	38,1	13,8	13,6	16,1	17,9	26,6	28,1	17,8	27,5
MP	15,1	20,4	65,0	42,9	41,2	45,7	39,3	38,9	63,0	36,1	37,3	31,3
MAE												
	Jan/23	Fev/23	Mar/22	Abr/22	Mai/22	Jun/22	Jul/22	Ago/22	Set/22	Out/22	Nov/22	Dez/22
RRS	12,2	8,5	19,5	31,0	11,3	8,9	12,8	13,3	21,6	19,8	11,6	19,0
MP	12,5	16,7	49,2	37,1	28,1	36,0	31,4	24,8	53,0	27,5	26,2	23,6
MAPE												
	Jan/23	Fev/23	Mar/22	Abr/22	Mai/22	Jun/22	Jul/22	Ago/22	Set/22	Out/22	Nov/22	Dez/22
RRS	15,4	12,3	27,4	36,6	14,6	9,4	17,6	19,2	39,2	28,3	17,1	35,4
MP	13,1	18,4	64,4	48,8	38,3	66,3	37,4	31,1	86,1	34,8	26,6	26,5

O desempenho de predição da geração fotovoltaica dos métodos RRS e MP também está apresentado nas Figuras 3, 4, 5 e 6. Foram considerados sete dias consecutivos para cada estação do ano. Entre esses dias, estão inseridos todos os três perfis de previsão do tempo. A predição utilizando o método RRS foi comparada com a geração fotovoltaica real (GR) e com a predição pelo método MP. Os gráficos de desempenham mostram visualmente que o RRS obteve um desempenho melhor que o do MP em todas as estações do ano.

**Figura 3:** Gráfico de predições RRS e MP com a GR de 7 dias para a estação verão.**Figura 4:** Gráfico de predições RRS e MP com a GR de 7 dias para a estação outono.

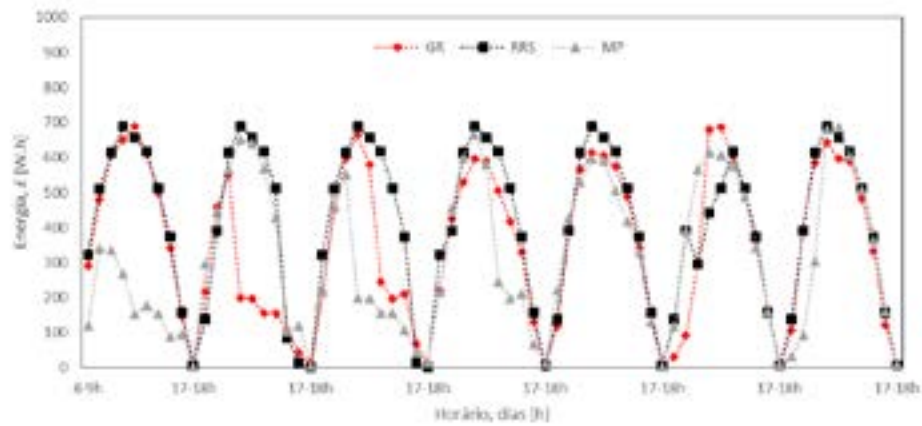


Figura 5: Gráfico de predições RRS e MP com a GR de 7 dias para a estação inverno.

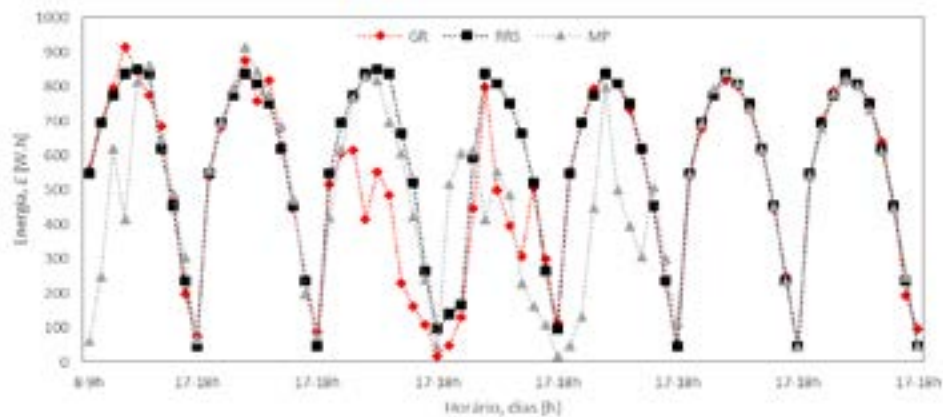


Figura 6: Gráfico de predições RRS e MP com a GR de 7 dias para a estação primavera.

A predição da geração fotovoltaica por meio dos dois métodos de predição apresenta uma maior incerteza nos dias com perfis Intermediário e Chuvoso/nublado em todas as estações do ano. A predição por meio do RRS apresenta incertezas menores que as do MP em dias com os perfis Intermediário e Chuvoso/nublado.

O desempenho dos métodos RRS e MP também foram analisados pela plataforma *Open Weather* e estão apresentados nas Figuras 7, 8, 9 e 10. Foram considerados sete dias consecutivos para cada estação do ano. Entre esses dias, estão inseridos todos os três perfis de previsão do tempo. A predição utilizando o método RRS foi comparada com a geração fotovoltaica real (GR) e com a predição pelo método MP. Os gráficos de desempenho mostram visualmente que o RRS utilizando a plataforma *Open Weather* também obteve um desempenho melhor que o do MP em todas as estações do ano.

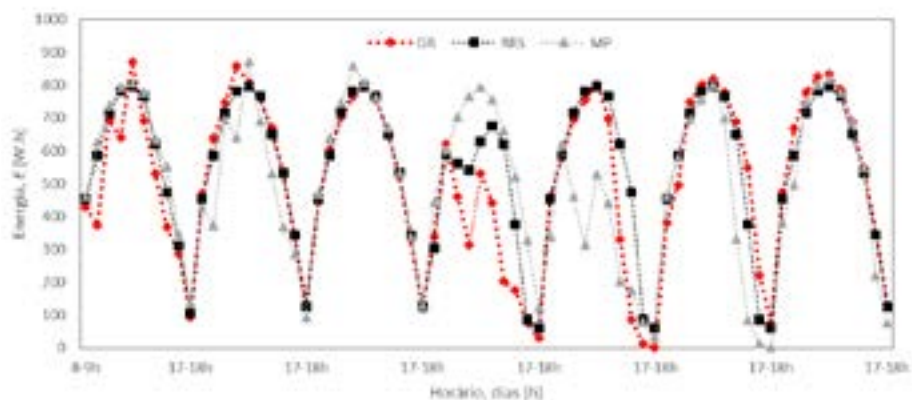


Figura 7: Gráfico de predições RRS e MP com a GR de 7 dias para a estação verão.

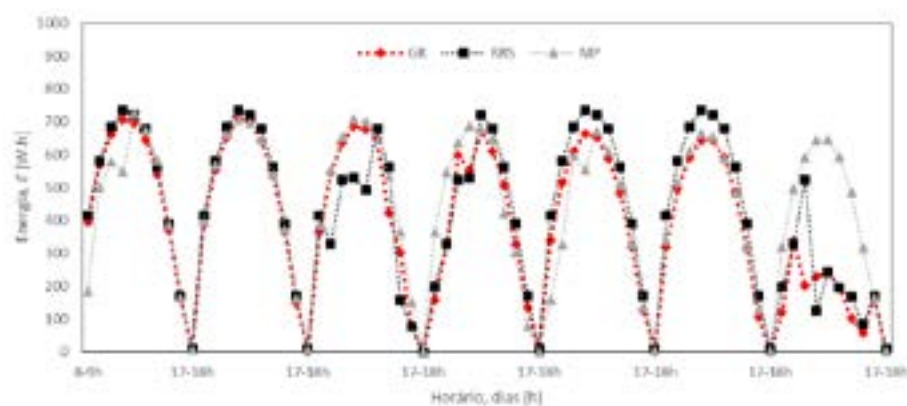


Figura 8: Gráfico de predições RRS e MP com a GR de 7 dias para a estação outono.

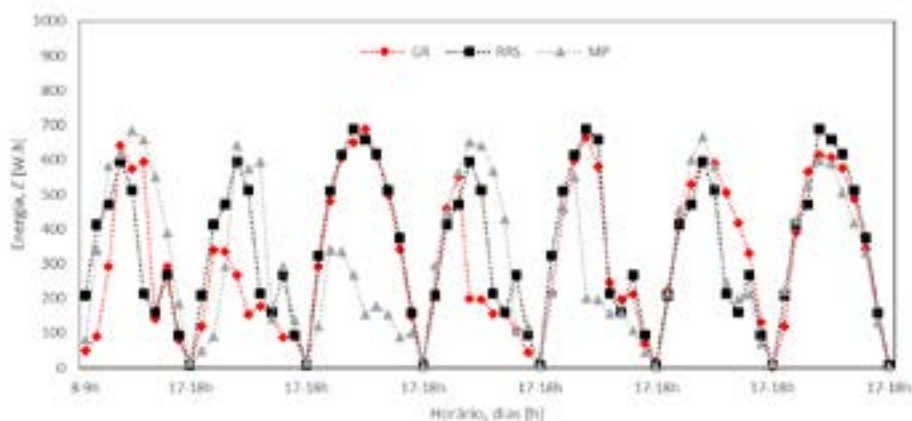


Figura 9: Gráfico de predições RRS e MP com a GR de 7 dias para a estação inverno.

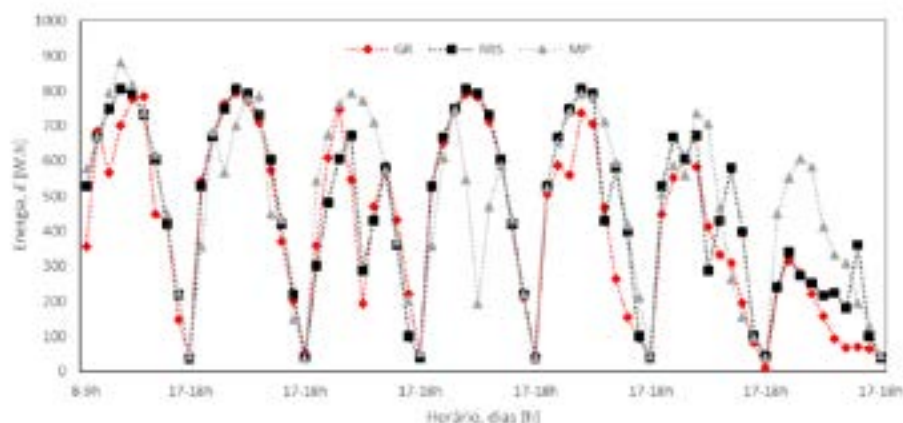


Figura 10: Gráfico de predições RRS e MP com a GR de 7 dias para a estação primavera.

A predição da geração fotovoltaica por meio dos RRS e MP utilizando a plataforma *Open Weather* apresenta uma maior incerteza nos dias com perfis intermediário e chuvoso/nublado em todas as estações do ano. A predição por meio do RRS apresenta incertezas menores que as do MP em dias com os perfis intermediário e Chuvoso/nublado.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método de predição RRS foi desenvolvido utilizando duas entradas de dados: a primeira foi dos dados históricos reais de geração de energia elétrica do SFCR localizado na UFSC, Campus Araranguá-SC, e a segunda foi dos dados de previsão meteorológica das plataformas *Ventusky* e *Open Weather*.

O RMSE médio anual para o perfil Ensolarado, utilizando o método RRS através da plataforma *Ventusky*, foi de 15,7% e por meio da plataforma *Open Weather* foi de 10,2%. Para o mesmo perfil, com o método MP, o RMSE médio anual foi de 20,4% utilizando a plataforma *Ventusky* e de 23,1% utilizando a plataforma *Open Weather*. Para o perfil Intermediário, o método RRS obteve RMSE médio anual de 25,0% utilizando a plataforma *Ventusky* e de 21,1% utilizando a plataforma *Open Weather*, enquanto o método MP obteve 47,8% por meio da plataforma *Ventusky* e 21,9% através da plataforma *Open Weather*. No perfil Chuvoso/nublado, o método RRS obteve um RMSE médio anual de 10,0% utilizando a plataforma *Ventusky* e de 28,0% utilizando a plataforma *Open Weather*. O método MP apresentou um RMSE de 85,6% utilizando a plataforma *Ventusky* e de 42,2% utilizando a plataforma *Open Weather*.

Utilizando a plataforma *Ventusky*, o RMSE médio mensal para o método RRS variou entre 7,3% e 50,1%, enquanto para o método MP variou entre 15,1% e 65,0%. O MAE médio mensal para o método RRS variou entre 5,0% e 38,9%, enquanto que o método MP variou entre 12,5% e 53,0%. O MAPE médio mensal para o RRS variou entre 6,1% e 49,4%, enquanto que o método MP variou entre 13,1% e 86,1%. Por meio da plataforma *Open Weather*, o RMSE médio mensal para o método RRS variou entre 13,6% e 38,1%, enquanto para o método MP variou entre 15,1% e 65,0%. O MAE médio mensal para o método RRS variou entre 8,5% e 31,0%, enquanto que o método MP variou entre 12,5% e 49,2%. O MAPE médio mensal para o RRS variou entre 9,4% e 39,2%, enquanto que o método MP variou entre 13,1% e 86,1%.

REFERÊNCIAS

- [1] PEARSALL, N. The Performance of Photovoltaic (PV) Systems, Modelling, Measurement and Assessment, Elsevier, 1^a Ed. 2017, 352p.
- [2] BARBIERI, F.; RAJAKARUNA, S.; GHOSH, A. Very short-term photovoltaic power forecasting with cloud modeling: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*, 2017, 75, 242-263. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.068>
- [3] BÖÖK, H; LINDFORS, A. Site-specific adjustment of a NWP-based photovoltaic production forecast, *Solar Energy.*, 2020, 211, 779-788. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.10.024>
- [4] LORENZO, E. Radiación Solar y Dispositivos Fotovoltaicos, *Electricidad Solar Fotovoltaica*, V. II, Espanã, 2006.
- [5] PINHO, J. T., GALDINO, M. A. Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos. Rio de Janeiro, 2014.
- [6] PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. J. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2^a Ed. São José dos Campos, 2017, 88p.
- [7] WIRTH, H. Recent Facts about Photovoltaics in Germany, Fraunhofer ISE, 2020. Disponível: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/recent-facts-about-pv-in-germany.html>
- [8] GUEYMARD, C. A. A review of validation methodologies and statistical performance indicators for modeled solar radiation data: Towards a better bankability of solar projects, *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*, 2014, 39, 1024 – 1034. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.117>
- [9] ANTONANZAS, J.; OSORIO, N.; ESCOBAR, R.; URRACA, R.; MARTINEZ-DE-PISON, F.J.; ANTONANZAS-TORRES, F. Review of photovoltaic power forecasting. *Solar Energy.*, 2016, 136, 78–111. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2016.06.069>
- [10] MACIEL, J. N. Método Híbrido de Predição com Processamento de Imagens e Inteligência Artificial Aplicável à Geração de Energia Solar Fotovoltaica, Tese de Doutorado, UNILA, Foz do Iguaçu, 2022.
- [11] DEWANGAN, C. L.; SINGH, S. N.; CHAKRABARTI, S. Combining forecasts of day-ahead solar power, *Energy.*, 2020, 202. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117743>



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil

26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de

Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming

Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis

12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

BASES DA PRODUÇÃO E USO SEGURO DO HIDROGÊNIO

Jorge Pimentel de Moraes - Autor ⁽¹⁾

Fabio Bergel - Autor ⁽²⁾

João André Bitencourt dos Santos - Autor ⁽³⁾

Maurício da Silveira Costa - Autor ⁽³⁾

Paulo Washington Souza Bastos - Autor ⁽⁴⁾

Júlio Cesar Marques de Lima - Orientador ⁽⁵⁾

Marçal Rodrigues Pires - Orientador ⁽⁶⁾

Vicente Mariano Canalli - Orientador ⁽⁶⁾

RESUMO

O recente conflito Rússia-Ucrânia antecipou a busca por novas alternativas de fontes de energia limpa, no sentido da mudança da matriz energética. Vive-se uma transição energética. Até mesmo a Alemanha teve sua população ameaçada, no último inverno, registrando mortes por frio, por sua dependência do gás russo. Neste cenário, o hidrogênio é uma solução de aplicação imediata, tendo em vista o estado da técnica existente, também no Brasil. Dentre os conceitos implantados, a geração distribuída, o hidrogênio reformado, os painéis solares, são alternativas que seguem a mesma linha conceitual de independência energética. A partir da vocação local, como no caso do Brasil a sua infraestrutura de produção de etanol pode ser utilizada, mediante a utilização de uma célula a combustível, que opera a partir da reforma. A utilização segura do hidrogênio como um combustível é uma meta principal da ISO, visando facilitar a implantação desta tecnologia. Um elemento fundamental na utilização segura do hidrogênio é a compreensão de que suas propriedades que são peculiares. Mediante orientações, o relatório técnico a ABNT ISO/TR 15916, fornece atualmente diretrizes básicas para a utilização do hidrogênio em suas formas gasosa e líquida. A nível mundial, outras soluções estão em andamento, como o caso de uma usina hidrelétrica na África, onde é gerado hidrogênio, que é transformado em amônia, para que seja transportado por via marítima, aos mercados consumidores. Para tanto, este trabalho objetiva trazer os elementos que compõem o uso seguro do hidrogênio, sua geração, armazenamento e uso. Ao longo desse artigo, serão detalhados aspectos que vão desde as infraestruturas de produção, equipamentos de proteção e monitoramento, até ao devido armazenamento.

⁽¹⁾ Mechanical Engineer; Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil

⁽²⁾ Electrical Engineer, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil

⁽³⁾ Electrical Engineer Student, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil

⁽⁴⁾ Automation Control Engineer Student, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil

⁽⁵⁾ Prof. Me., Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil.

⁽⁶⁾ Prof. Dr., Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil.

Todos estes procedimentos devem ser necessariamente acompanhados por pessoal qualificado, em cumprimento dos requisitos estabelecidos por procedimentos reconhecidos. Esse artigo se propõe a analisar as diferentes alternativas, de produção e uso seguro do hidrogênio, incluindo o seu transporte em veículos dedicados.

Palavras Chave: Segurança do hidrogênio, Célula de combustível, hidrogênio, norma ISO

BASIS OF THE PRODUCTION AND SAFE USE OF HYDROGEN

Jorge Pimentel de Moraes - Autor ⁽¹⁾

Fabio Bergel - Autor ⁽²⁾

João André Bitencourt dos Santos - Autor ⁽³⁾

Maurício da Silveira Costa - Autor ⁽³⁾

Paulo Washington Souza Bastos - Autor ⁽⁴⁾

Júlio Cesar Marques de Lima - Adviser ⁽⁵⁾

Marçal Rodrigues Pires - Adviser ⁽⁶⁾

Vicente Mariano Canalli - Adviser ⁽⁶⁾

ABSTRACT

The recent Russia-Ukraine conflict anticipated the search for new alternatives for clean energy sources, in the sense of changing the energy matrix. We are experiencing an energy transition. Even Germany had its population threatened last winter, registering deaths from cold, due to its dependence on Russian gas. In this scenario, hydrogen is a solution for immediate implementation, in view of the existing state of the art, also in Brazil. Among the implemented concepts, distributed generation, reformed hydrogen, solar panels, are alternatives that follow the same conceptual line of energy independence. From the local vocation, as in the case of Brazil, its ethanol production infrastructure can be used, through the use of a fuel cell, which operates from reformed ethanol. The safe use of hydrogen as a fuel is a key goal of ISO, aiming to facilitate the deployment of this technology. A key element in the safe use of hydrogen is understanding what its unique properties are. Based on the guidelines of the technical report, ABNT ISO/TR 15916 currently provides basic guidelines for the use of hydrogen in its gaseous and liquid forms. Worldwide, other solutions are in progress, such as the case of a hydroelectric plant in Africa, where hydrogen is generated, which is transformed into ammonia, to be transported by sea to consumer markets. Therefore, this work aims to bring the elements that make up the safe use of hydrogen, its generation, storage and use. Throughout this article, aspects ranging from production infrastructure, protection and monitoring equipment, to proper storage will be detailed. All these procedures must necessarily be accompanied by qualified personnel, in compliance with the requirements established by recognized procedures. This article proposes to analyze the different alternatives for the production and safe use of hydrogen, including its transport in dedicated vehicles.

Keywords: Hydrogen Safety, Fuel Cell, Hydrogen, ISO Standard

1. INTRODUÇÃO

O hidrogênio é considerado o elo-energético como ilustrado na figura 1.

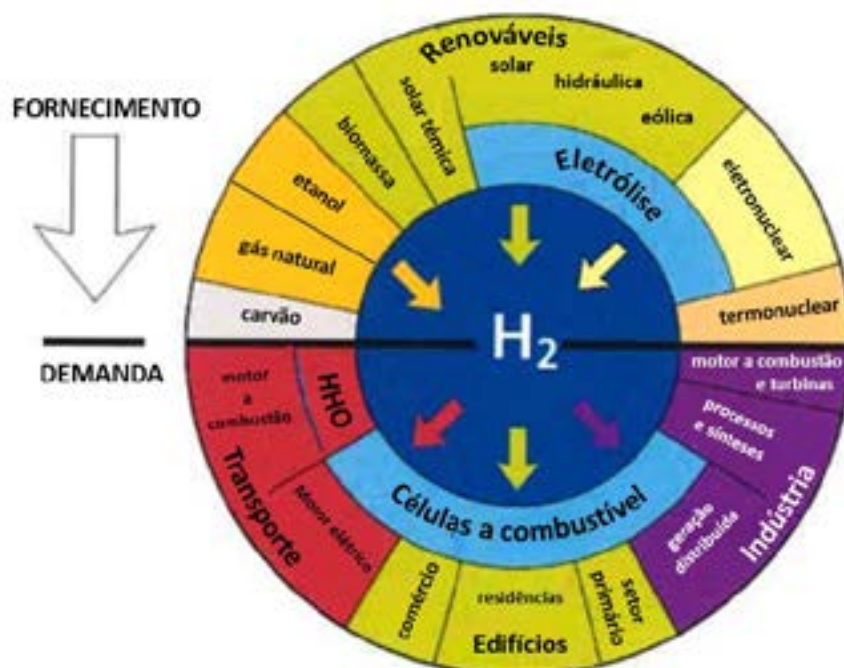


Figura 1: Hidrogênio e elo energético – traduzido e adaptado de [1]

Todavia a segurança é o principal gargalo em qualquer projeto experimental, que utilize a tecnologia do hidrogênio. Da segurança depende qualquer frente de pesquisa prevista para a sua utilização, como ilustra a figura 2



Figura 2: Segurança é o gargalo nas principais frentes de aplicação - adaptação com [2]

A PUCRS – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, trabalhou há muito tempo na Tecnologia do Hidrogênio. Enfrentou-se muitos entraves para seguir este ramo de pesquisa, o principal deles, a utilização segura do hidrogênio. Na ciência de que é preciso evoluir sem poluir, procedimentos de segurança são frequentes na operação de equipamentos com hidrogênio. Na ótica do Grupo de Energia e Aplicação de Gases do CNPq – Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento, é imperativa a participação de pesquisadores e de setores especializados da PUCRS, para o registro e apoio nas atividades de pesquisa. Para agregar valor de forma segura, aos equipamentos atualmente disponíveis no LENAG – Laboratório de Energia e Aplicação de Gases, que foi implementado ainda em 2005 com apoio da ANEEL - Agência de Energia Elétrica, foi sugerida a sua aplicação didática na forma demonstrativa. A edição Extraordinária do Projeto BPA – Bolsa para Alunos PUCRS de 2022, contribuiu com um bolsista para este estudo. Dessa forma foi necessário

aprimorar um trabalho teórico voltado à segurança e estudo de normas, cujo assunto é abordado neste artigo.

2. REQUISITOS IMPORTANTES DE PROJETOS ENVOLVENDO O HIDROGÊNIO

Nesta seção, são descritos alguns requisitos importantes na idealização de projetos envolvendo o hidrogênio.

2.1 Concordância das partes interessadas

Após os propósitos serem minuciosamente avaliados pelos envolvidos no projeto e tomada a decisão de seu desenvolvimento, o pré-requisito inicial é a concordância das partes interessadas.

2.2 Designação dos responsáveis técnicos

Uma vez existindo a concordância das partes interessadas, são definidos os participantes e responsáveis técnicos multidisciplinares, em função das *competências relacionadas às exigências relacionadas*. Este processo envolve *certificação*.

2.3 Comprometimento das partes interessadas

Na mesma linha adotada pelas Normas ISO 9000, por ocasião da implantação de um Sistema da Qualidade, onde é exigido que as partes interessadas *manifestem explicitamente seu comprometimento*, em um projeto envolvendo hidrogênio, é decisivo que isso aconteça. Ainda sobre a ISO 9000, comprometimento é extensível à *alta diretoria*.

2.4 Elaboração do projeto conforme normas técnicas vigentes

Coerente com os objetivos estabelecidos, no sentido de cumprir os Requisitos Legais e Normativos estabelecidos, a elaboração do projeto cumpre rigorosamente as Normas Técnicas relacionadas. Importante salientar que nesse caso são considerados os *Requisitos Aplicáveis*, como por exemplo, em casos e que não for utilizado o hidrogênio no estado líquido. Ainda sobre as Normas Técnicas, devem ser adotadas as diretrizes estabelecidas pelo Relatório Técnico ABNT ISO/TR 15916, bem como o manual *Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies, Revision 0, december 2001*

2.5 Aprovação e execução do projeto

Asseguradas todas as etapas descritas e aprovado o projeto, sua execução também cumpre os requisitos pertinentes, inclusive tendo suas etapas registradas para futura auditoria, que será permanente. Os registros seguirão os padrões das já citadas Normas ISO, tendo seus responsáveis identificados para possível rastreabilidade, como quando for o caso de uma *não-conformidade*, que terá o tratamento devido, suas *ações preventivas* bem como as *ações corretivas*. Tudo isso deve ser descrito em um Manual de Procedimentos, que constará de todos os protocolos pertinentes, de maneira a garantir o uso seguro do hidrogênio. Os registros serão oportunamente auditados.

2.6 Registro do projeto no órgão competente

Uma vez elaborado o projeto, aprovado, e executado, toda a documentação relacionada será encaminhada aos Órgãos Competentes, no sentido de emitir o documento definitivo que é a ART – Anotação de Responsabilidade Técnica.

3. REQUISITOS DA INSTALAÇÃO FÍSICA E ELÉTRICA

De acordo com o manual *Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies, Revision 0, december 2001*, em seu item 10.1, Guia de Manutenção de Instalações, nos itens aplicáveis, tem-se: sistema de detecção de vazamentos, com seu plano de resposta de emergência; sistema de detecção de fogo, com seu plano de resposta de emergência, classificação de locais elétricos perigosos; ventilação positiva e sistemas de parada de emergência. Para laboratórios similares ao LENAG, tem-se a intenção de propor o desenvolvimento de um aplicativo, como um elemento de inovação. Já o

Relatório Técnico ABNT ISO/TR 15916:2010, no seu item 5 – Considerações de segurança para utilização de hidrogênio gasoso e líquido, é bem mais abrangente, iniciando com todos os riscos devido às propriedades do hidrogênio (combustão, pressão, temperatura, fragilização por hidrogênio, danos à saúde, treinamento de recursos humanos, mitigação e controle de riscos.

4. SÍNTESE DE DISPOSITIVOS ORIENTADOS A SEGURANÇA ATIVA

Os dispositivos de segurança ativa são aqueles que atuam antes do evento adverso, como por exemplo:

- a) Alarme detecção presença hidrogênio (sonoro, luminoso, por aplicativo)
- b) Bloqueio automático da linha de alimentação
- c) Acionamento do sistema de exaustão em regime máximo, ou ventilação positiva
- d) Deslocamento imediato de responsáveis técnicos
- e) Uso de EPIs *anti-estática*
- f) Sistema elétrico à prova de faíscas
- g) Válvulas de controle de fluxo *anti-formação* de jatos de fogo
- h) Sistemas de prevenção de deflagração gasosa
- i) Sistemas de prevenção de detonação gasosa
- j) Sistemas de prevenção e mitigação de descargas atmosféricas
- k) Sistemas de prevenção de incêndios
- l) Sistemas de aterramento muito eficientes

5. SEGURANÇA ATIVA EM TESTE EXPERIMENTAL COM O USO DE DETECTOR DE GASES

Pequenos vazamentos de hidrogênio gasoso são difíceis de detectar pelos sentidos humanos, uma vez que o hidrogênio é incolor, inodoro e insípido. A detecção é um método utilizado para testar vazamentos em uma linha de gases. Em muitos casos é utilizado tanto na limpeza quanto na pressurização das linhas um gás inerte como o nitrogênio. É importante frisar que a molécula do hidrogênio é bem menor do que a do nitrogênio, tornando mais fácil a sua fuga nas instalações. Todavia os problemas com vazamentos são mitigados na medida em que são utilizadas linhas de baixa pressão. Em sistemas adequadamente concebidos, estas fugas muito pequenas não representam um problema, uma vez que a pequena quantidade de hidrogênio libertada não será suficiente para causar uma mistura inflamável no ar. Somente quando o gás hidrogênio puder se acumular ao longo do tempo em uma área confinada, surgirá o risco de uma mistura inflamável ou asfíxiante. O vazamento de hidrogênio aumentará e se difundirá rapidamente no ar porque sua baixa densidade resulta em alta *flutuabilidade*, pois é quatorze vezes menos denso que o ar. O hidrogênio se mistura facilmente com o ar com uma difusividade três vezes maior que o nitrogênio, podendo chegar a uma mistura inflamável. Este perigo é especialmente importante quando o hidrogênio se acumula em uma área confinada. Nos testes com linha pressurizada de gases, recomenda-se aguardar um tempo para a estabilização do gás na linha. Com o tempo o operador deve observar as alterações em um medidor de pressão, o que permite registrar vazamentos. O tempo de teste pode variar de acordo com o tamanho da tubulação, podendo ser de uma a vinte e quatro horas, verificando-se a ocorrência de alguma alteração na pressão da linha. Neste caso as conexões, e válvulas do sistema e de equipamentos devem ser examinadas com um detector apropriado de gases. A verificação nas conexões pode ser realizada na prática, de forma simples, por imersão ou via uma solução de borbulha adequada. Detectores de vazamento de hidrogênio encontrarão vazamentos que nem mesmo formarão uma bolha. Por este motivo os métodos de detecção de vazamento de hidrogênio incluem: o uso de detectores portáteis de hidrogênio ou então dos permanentemente ligados a alarmes sonoros ou visíveis locais ou em toda a instalação. Embora ainda não utilizado com o hidrogênio, um estudo e avaliação da aplicabilidade do equipamento da detecção experimental de vazamentos deverá ser proposto no futuro, com finalidade didática, com vistas a incrementar a segurança ativa em um sistema ou laboratório que utilizam o hidrogênio. Com o devido consentimento e mediante procedimentos de utilização segura um equipamento disponível no Labelo – Laboratórios Especializados em Eletro Eletrônica, permite a detecção de vazamento de gás marca Testo modelo 316-4, visto na figura 3, é uma alternativa. Segundo o manual, este equipamento é um detector de vazamento não específico, aplicável a refrigerantes especiais como R134a, R22, R404a, H2 (hidrogênio) e NH3 (amônia) e comuns como CFC, HCFC, HFC NH3. Com seu alto nível de sensibilidade máxima de 3g/ ano de acordo com o padrão EN

14624, e o manual, permite a detecção de até mesmo de vazamentos muito pequenos, com seu *display* mudando de verde para vermelho.



Figura 3: Detector de gases marca Testo modelo 316-4

Além disso, um sinal sonoro é acionado, facilitando a localização de vazamentos. O pescoço flexível permite o posicionamento ideal do sensor próximo ao tubo ou outro local de medição, permitindo acesso de locais de difícil acesso em equipamentos. O hidrogênio além de incolor e inodoro é o mais leve de todos os gases e, portanto sobe. Assim, o detector deve ser instalado no ponto mais alto e sem correntes de ar local no compartimento do equipamento ou sala onde o gás hidrogênio tenderia a se acumular. O tamanho da área que um detector protegerá depende da bateria compartimento ou quarto. Um detector mede a concentração de gás hidrogênio no ar imediatamente ao redor do sensor. Em ambientes onde o hidrogênio possa se acumular em distintas áreas detectores individuais devem ser colocados em cada local. Concentrações de 4,1% a 75% misturadas com ar podem ser explosivas. Faíscas ou superfícies quentes podem produzir um incêndio. Um alerta gradativo em concentrações como 1 ou 2% facilitará a tomada de medidas necessárias para a dissipação de hidrogênio antes de atingirem o Limite Inferior de Explosividade de 4,1%. Processos de ventilação forçada e de fechamento de válvula automatizados e também manuais, poderão ser muito eficientes neste caso específico.

6. SEGURANÇA ATIVA E PROTÓTIPO DE DETECTOR DE GASES INCLUINDO APLICATIVO

Esforços para incrementar a segurança ativa, tem em vista desenvolver protótipos destinados monitoramento de vazamentos do hidrogênio (H_2). que fazem o uso de um aplicativo, como o representado no diagrama da figura 4.

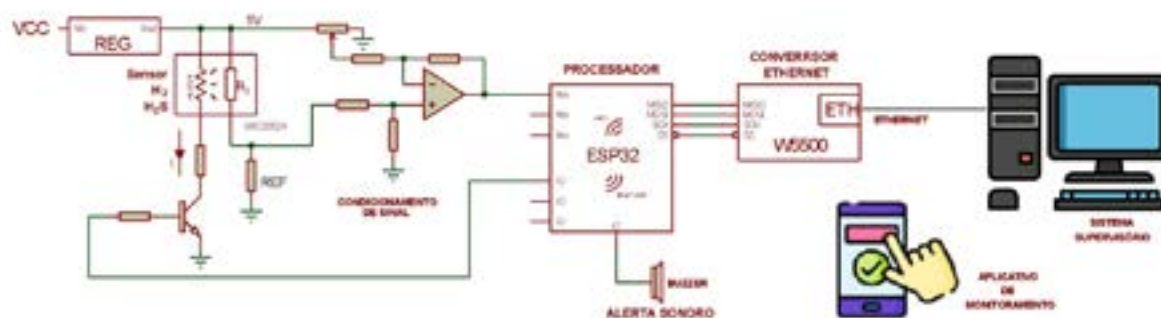


Figura 4: Diagrama básico de um protótipo de detector de gases incluindo um aplicativo

O protótipo proposto utiliza um microcontrolador com circuitos de RF ou Rádio Frequência que permitem conexão WiFi e *Bluetooth*. ideal para esta implementação. A conexão por meio de rede cabeada Ethernet pode ser feita utilizando um conversor SPI-Ethernet chamado W5500. Com isto é possível disponibilizar os dados em computadores rodando um sistema de supervisão e em *smartphones* rodando aplicativos com conexão *bluetooth*. O vazamento de gás é detectado com a utilização de sensores sensíveis ao gás hidrogênio. com variação de resistência em função da sua concentração (resistência com coeficiente negativo). Geralmente, este tipo de sensor necessita de um aquecimento que provoca uma reação na presença do gás monitorado. Há várias formas de se instrumentar este sensor. O modo mais simples e direto, consiste na construção de um divisor de tensão, utilizando um resistor de referência. Para adequar a variação de tensão a faixa de operação do conversor A/D (0 a 3,3V), um circuito subtrator (condicionador de sinal) é acrescentado, de modo a explorar ao máximo a faixa dinâmica do conversor e com isto, melhorar a sensibilidade da medição. Um pino de IO do microcontrolador controla a resistência de aquecimento do sensor. Isto permite ao sistema desligar o aquecimento do sensor quando a leitura for interrompida. O regulador colocado no

circuito garante que a tensão no divisor resistivo é constante caso o sistema tenha que ser alimentado por baterias, deixando a leitura imune a variações de tensão da bateria por conta do processo de descarga. O sistema conta ainda com um *buzzer* para emitir um alerta sonoro, caso a concentração de gás fique acima de um determinado limiar.

7. SÍNTESE DE DISPOSITIVOS ORIENTADOS A SEGURANÇA PASSIVA

Os dispositivos de segurança passiva são aqueles que atuam após o evento adverso como por exemplo:

- Imediato acionamento de equipes de incêndio e emergência
- Imediata busca das causas do evento e eliminá-las
- Imediata busca por possíveis vítimas
- Mitigação dos efeitos do evento adverso
- Imediata ação corretiva no sentido de eliminar novos casos
- Imediato treinamento para a implantação das ações corretivas
- Reavaliar o projeto e instalações restabelecendo sua operação segura

8. SEGURANÇA PASSIVA E PROTÓTIPO DE DETECTOR DE CHAMAS INCLUINDO APLICATIVO

Visando incrementar a segurança passiva, após um evento adverso de incêndio, é proposto neste estudo um diagrama em blocos de um protótipo de um sistema de detecção de chama, representado no diagrama em blocos da figura 5.

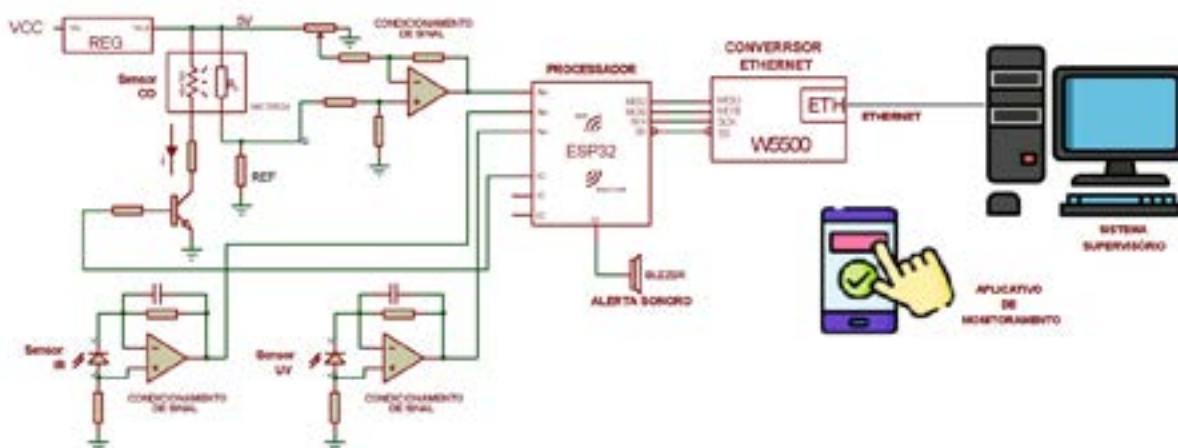


Figura 5: Protótipo de um detector de chammas

Este sistema utiliza um *microcontrolador* para processamento das informações, similar ao utilizado no diagrama da figura 4. Também este o sistema admite conexão por meio de rede cabeada *Ethernet*. Com isto é possível disponibilizar os dados coletados em computadores via um sistema de supervisão e em *smartphones* com aplicativos com conexão *bluetooth*. A detecção de chama normalmente é realizada com uma combinação de sensores de gás e de sensores ópticos, uma vez que a chama não produz luz visível. Além de incluir um detector de gás similar ao já descrito, o sistema proposto necessita detectar comprimentos de onda não visíveis na faixa de infravermelho e ultravioleta, com o intuito de alertar a presença de chammas invisíveis a olho nu. Para a detecção de comprimentos de onda no espectro infravermelho são usados em geral fotodiodos, que requerem um amplificador de *transimpedância* para adequar o sinal medido a faixa dinâmica do conversor analógico digital. Da mesma forma que no protótipo do detector de gases, o sistema conta adicionalmente com um *buzzer* que emite um alerta sonoro, caso o microcontrolador considere que a leitura dos sensores leve o mesmo a concluir que esteja presenciando a ocorrência de chama.

9. ESCOLHA DE EPIS E ELABORAÇÃO DE PROCEDIMENTOS SEGUROS

A definição de EPIS – Equipamentos de Proteção Individuais e a elaboração de procedimentos seguros passa por seleção de *materiais anti-estática*.

Além dos itens tradicionais exigidos por Normas Técnicas de Segurança no Trabalho, é importante destacar a preocupação com possíveis fontes de ignição, como as provocadas por estática.

10. QUALIFICAÇÃO TÉCNICA E TREINAMENTO

Além da formação técnica específica pertinente, é implementado um curso adicional, relacionado aos itens aplicáveis ao caso, de caráter multidisciplinar, de forma a garantir que todos os conteúdos e elementos conceituais envolvidos, sejam entendidos em absorvidos.

CONCLUSÃO

Este artigo permitiu apresentar efeitos da crise mundial de energia, e da mudança na matriz energética, e com soluções sustentáveis conhecidas sendo implantadas. Também permitiu identificar a vocação da energia limpa do Brasil, tendo em vista a grande diversidade de fontes de energia aplicadas no país, conforme declarou o Diretor da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, o Almirante Rodolfo de Saboia, em sua participação na Comissão Especial para o Debate de Políticas Públicas sobre o Hidrogênio Verde, do Senado Federal, afirmando via uma expressão usual em inglês que “...o Brasil é uma *power house*, uma casa de força, sob todas as fontes de energia imagináveis. Neste cenário, o hidrogênio é um grande protagonista, e o entendimento sobre a sua geração, transformação, armazenamento, transporte e aplicações de forma segura, merece toda a atenção e estudos. Assim sendo, o objetivo primordial é a formação e treinamento de recursos humanos para as situações reais, que pode ser alcançada mediante laboratórios dedicados à didática do hidrogênio.

AGRADECIMENTOS

O autor principal agradece aos orientadores, que há vinte anos atrás, colocaram uma pedra fundamental na construção do conhecimento do hidrogênio, criando o LENAG – Laboratório de Energia e Aplicação de Gases, bem como ao Grupo de Pesquisa de Energia e Aplicação de Gases do CNPq. Agradecemos a ANEEL – Agência de Energia Elétrica e CEEE – Companhia Estadual de Energia Elétrica que apoiou o projeto piloto que foi submetido ao edital de Pesquisa e Desenvolvimento. Também ao CNPq e a PUCRS que tem incentivado as pesquisas, proporcionado bolsas de Iniciação Científica destinadas ao Grupo de Energia e Aplicação de Gases. Finalmente agradecemos aos organizadores do Senafor pelo convite e incentivo a participação de integrantes do Grupo de Pesquisa de Energia e Aplicação de Gases do CNPq no Renomat.

REFERÊNCIAS

- [1] EUROPEAN COMMISSION, 2012 --- origem da figura 1
- [2] SITE GOVERNO DO RS (2023) - <https://estado.rs.gov.br/rs-aposta-no-hidrogenio-verde-como-combustivel-do-futuro>
- [3] RIEGER, C.; KUHNIMBOF T., Charging infrastructure for electric vehicles: A review of current problems and research efforts. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 132, 831-846., 2020
- [4] SIERZCHULA, W., BAKKER, S., & MAAT, K. The impact of electric vehicle charging infrastructure on the decision to purchase an electric vehicle: A stated preference experiment. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 69, 299-314, 2014.
- [5] DE HOOG, J., ZIETSMAN, J., & RADWAN, E. Analyzing electric vehicle charging infrastructure performance using big data. *Journal of Cleaner Production*, 249, 119261, 2020.
- [6] HUANG, S., ZHANG, H., CHEN, G.. Review of electric vehicle charging infrastructure planning research: Problems and solutions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 421- 435.5 5, 2019
- [7] SOARES, J., RIBEIRO, P., ARAÚJO, M.. Charging infrastructure deployment for electric vehicles: An analytical framework and Portuguese case study. *Transport Policy*, 70, 65-76, 2018.
- [8] JIANG, H., ZHANG, T., LIU, J.. Current challenges and future prospects of electric vehicle charging infrastructure development. *Energy Reports*, 7, 1155-1170, 2021.
- [9] GOMEZ VILCHEZ, J. J., MARTINEZ LOPEZ, R., MARTINEZ RAMOS, J. L. Electric vehicle charging infrastructure planning: A review of models and methods. *Energies*, 12(16), 3077, 2019
- [10] MARQUES, C., MOURA, F., BORGES, J., SOUSA, T. Electric vehicle charging infrastructure deployment: A review on drivers, impacts and challenges. *Energies*, 13(3), 552, 2020.
- [11] MOUSAVI, A., ROSHANDEL, R. Intelligent management of electric vehicle charging infrastructure: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 315, 128193., 2021.
- [12] LEE, Y. T., PARK, J. W., SON, J. H. Optimal deployment of electric vehicle charging infrastructure considering spatial and temporal charging patterns. *Energy Policy*, 160, 112824, 2022.



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil

26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de

Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming

Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis

12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

ESTADO DA TÉCNICA DO HIDROGÊNIO NA PUCRS

Jorge Pimentel de Moraes - Autor ⁽⁴⁾

Paulo Washington Souza Bastos - Autor ⁽²⁾

Eng. Fabio Bergel - Autor ⁽³⁾

João André Bitencourt dos Santos - Autor ⁽¹⁾

Marçal Rodrigues Pires - Orientador ⁽⁵⁾

Vicente Mariano Canalli - Orientador ⁽⁵⁾

RESUMO

Este artigo apresenta um Estado da Técnica do Hidrogênio na PUCRS. Atualmente diversos bolsistas de IC - Iniciação Científica –da PUCRS e do CNPq, do programa IC Voluntário, e participantes do projeto PEGA – Programa de Extensão e Gestão Continuada da PUCRS atuam no grupo de Energia e Aplicação de Gases do CNPq, certificado pela PUCRS. Ainda em 2003, a PUCRS iniciou pesquisas experimentais pioneiras envolvendo o hidrogênio decorrentes da aprovação e execução do projeto de pesquisa intitulado Estudo e Aplicação de Células Combustíveis na Geração de Energia. Este projeto foi submetido ao Edital P&D – Pesquisa e Desenvolvimento promovido pela ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica em conjunto com a CEEE – Companhia Estadual de Energia Elétrica. Uma vez aprovado, o referido projeto trouxe na ocasião oportunidades de estudo e pesquisa no PPGE – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e na graduação. Também neste mesmo projeto foi implementada a infraestrutura física do LENAG – Laboratório de Energia e Aplicação de Gases, agregando a contribuição de diversos especialistas em inúmeras áreas, incluindo o SESMT - Setor Especializado em Segurança e Medicina do Trabalho da PUCRS. Além de inúmeros módulos didáticos foram adquiridas duas unidades geradoras de energia com potência de saída de 1kW que utilizam células de combustível a hidrogênio. Trabalhos experimentais foram realizados na ocasião e atualmente a intenção é de utilizar o material disponível e adequar as instalações para a elaboração de um curso de certificação em segurança do hidrogênio.

Palavras-chave: Hidrogênio, células a combustível

⁽¹⁾ Electrical Engineer Student, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil

⁽²⁾ Control and Automation Engineer, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil

⁽³⁾ Electrical Engineer Student, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil

⁽⁴⁾ Mechanical Engineer Student, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil

⁽⁵⁾ Prof. Dr. Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil.

STATE OF THE TECHNIQUE ON HYDROGEN AT PUCRS

Jorge Pimentel de Moraes - Author ⁽⁴⁾
 Paulo Washington Souza Bastos - Author ⁽²⁾
 Eng. Fabio Bergel - Author ⁽³⁾
 João André Bitencourt dos Santos - Author ⁽¹⁾
 Marçal Rodrigues Pires - Orientador ⁽⁵⁾
 Vicente Mariano Canalli - Orientador ⁽⁵⁾

ABSTRACT

This article presents a State of the Technique on Hydrogen at PUCRS. Currently, several scholarship holders of IC - Scientific Initiation -from PUCRS and CNPq, from the IC Volunteer program, and participants from the PEGA project - Extension Program and Continued Management of PUCRS work in the Energy and Gas Application group of CNPq, certified by PUCRS. Also in 2003, PUCRS began pioneering experimental research involving hydrogen resulting from the approval and execution of the research project entitled Study and Application of Fuel Cells in Energy Generation. This project was submitted to the Public Notice R&D – Research and Development promoted by ANEEL – National Electric Energy Agency together with CEEE – State Electric Energy Company. Once approved, the said project brought opportunities for study and research at the PPGEE – Graduate Program in Electrical Engineering and at undergraduate level. Also in this same project, the physical infrastructure of LENAG - Energy and Gas Application Laboratory was implemented, adding the contribution of several specialists in numerous areas, including the SESMT - Specialized Sector in Occupational Safety and Medicine at PUCRS. In addition to numerous didactic modules, two energy generating units with an output power of 1kW using hydrogen fuel cells were acquired. Experimental work was carried out at the time and currently the intention is to use the available material and adapt the facilities for the preparation of a certification course in hydrogen safety.

Keywords: Hydrogen, fuel cells

1. INTRODUÇÃO

De acordo com [1-2], são usados códigos de cores na indústria de energia, para diferenciar a forma de produção do hidrogênio. Porém, ainda não há uma convenção universal, e essas definições de cores mudam, entre países, e com o passar do tempo. De acordo com a literatura, as seguintes cores são definidas, para o hidrogênio:

a) hidrogênio amarelo: é uma convenção relativamente nova para hidrogênio produzido por eletrólise usando apenas energia solar.

b) hidrogênio verde: Na convenção de cores do hidrogênio, é aquele produzido sem emissões de gases de efeito estufa. O hidrogênio verde é obtido, usando eletricidade limpa de fontes de energia renováveis excedentes, como a energia solar ou eólica, para eletrolisar a água, como ilustra a figura 1

Além do amarelo e verde, outras cores são definidas para o hidrogênio:

c) hidrogênio azul: É aquele produzido principalmente a partir do gás natural, por meio de um processo denominado reforma a vapor, que reúne gás natural e água aquecida na forma de vapor.

d) hidrogênio preto: Usa carvão mineral, que é preto, no processo de fabricação de hidrogênio, emitindo grande quantidade de gases de efeito estufa, sendo prejudicial ao meio ambiente.

e) hidrogênio marrom: Usa carvão turfa no processo de fabricação de hidrogênio e de forma similar ao hidrogênio preto, emite grande quantidade de gases de efeito estufa, sendo prejudicial ao meio ambiente.

f) hidrogênio turquesa: É aquele obtido usando um processo chamado pirólise do metano para produzir hidrogênio e carbono sólido. No futuro, o hidrogênio turquesa, pode ser avaliado como um

hidrogênio de baixa emissão, dependendo do processo térmico ser alimentado com energia renovável e do carbono ser armazenado ou usado permanentemente.

g) hidrogênio rosa: Utiliza eletricidade gerada em uma usina nuclear para realizar a eletrólise,

h) hidrogênio branco: é o hidrogênio geológico de ocorrência natural, encontrado em depósitos subterrâneos e criado por fratura hidráulica, com poucas ocorrências reportadas.

O processo de eletrólise, caracteriza-se por permitir a geração de hidrogênio com um alto grau de pureza, justamente o necessário para a operação das células a combustível que utilizam membranas de troca de prótons. Destaca-se na figura 1 a cadeia do hidrogênio verde.

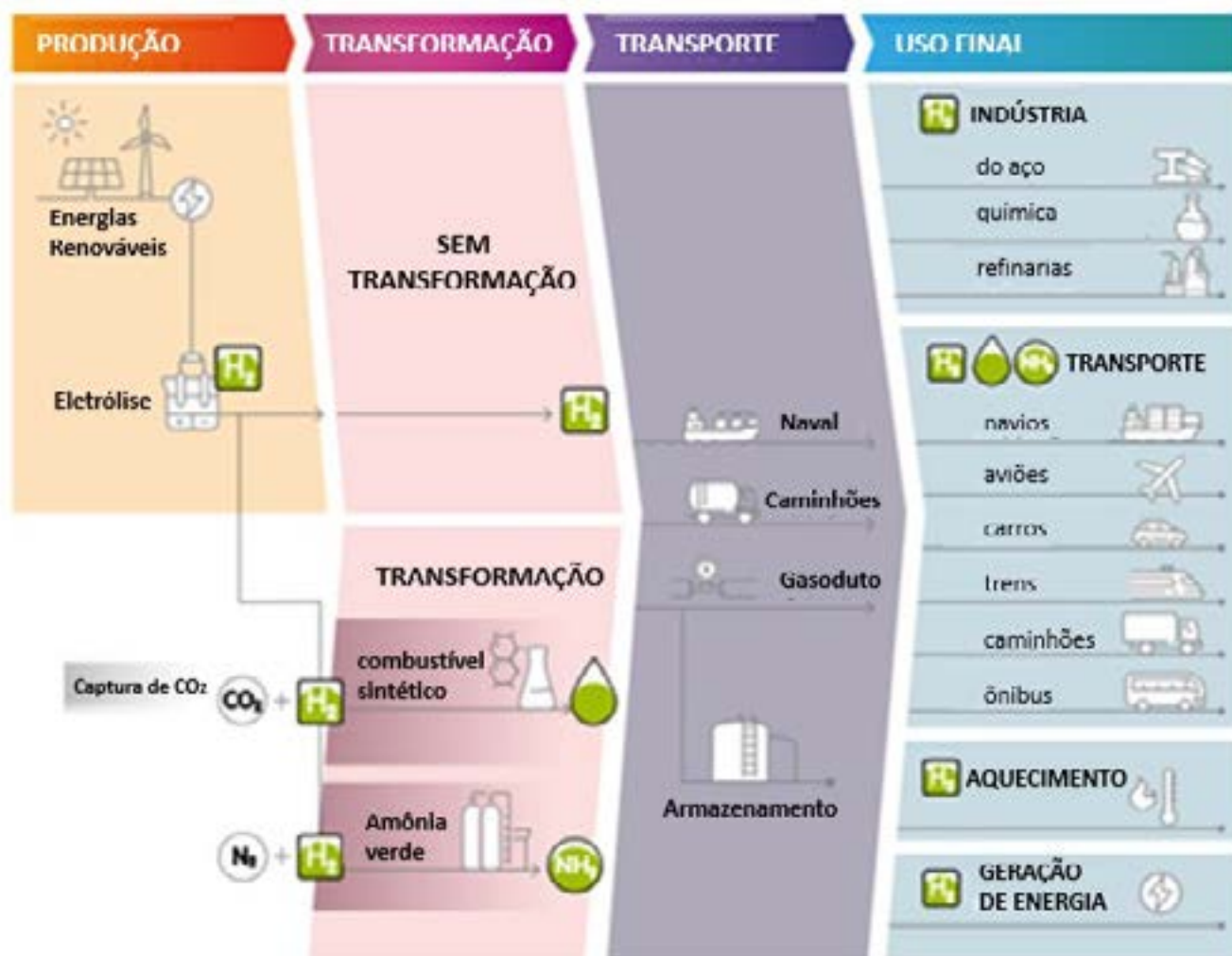


Figura 1: Cadeia do hidrogênio verde [1]

A eletrólise tem muitos outros usos:

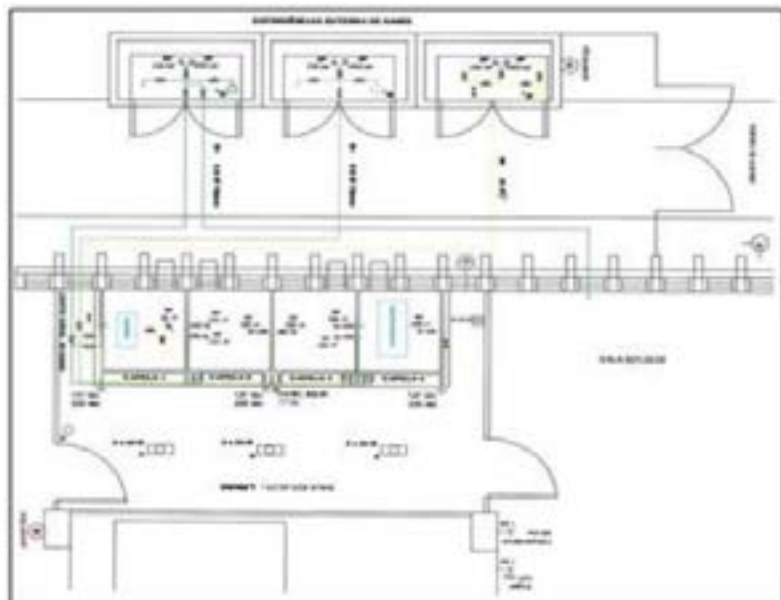
a) oxigênio: para naves espaciais e submarinos nucleares.

b) hidrogênio: como combustível veicular, como ilustra a figura 2.

c) oxi-hidrogênio: para diferentes finalidades, como limpeza de carbono em motores de combustão interna, corte de metais, gravação, polimento, sistemas de aquecimento, etc. O gás HHO tem muitas finalidades técnicas, como soldagem, gravação, corte, soldagem de componentes eletrônicos, como complemento combustível em motores de combustão interna.

2. INSTALAÇÕES DO LENAG – LABORATÓRIO DE ENERGIA E APLICAÇÃO DE GASES

Este laboratório, cuja planta é apresentada na figura 2 foi implementado com recursos da ANEEL, CEEE e PUCRS e atualmente está sendo revitalizado com uma finalidade puramente didática.



(a) planta do LENAG



(b) dependências de gases no exterior



(c) capelas internas

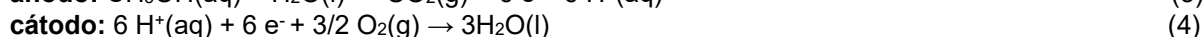
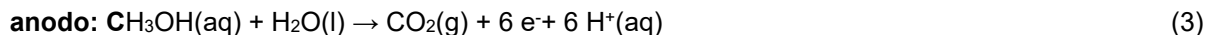
Figura 2: Vista do LENAG – Laboratório de Energia e Aplicação de Gases – ANEEL/CEEE/PUCRS [3]

3. KITS DIDÁTICOS DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL A HIDROGÊNIO E METANOL DIRETO

Foram adquiridos kits didáticos de células de combustível a hidrogênio com Membrana de Intercâmbio de Prótons ou PEM – *Proton Exchange Membrane*, que são ilustrados na figura 3(a) e cuja reação anódica, e catódica são:



Kits didáticos de Células de Combustível a Metanol Direto ou DMFC – *Direct Methanol Fuel Cell* similares a da figura 3(b) foram obtidos via importação. A reação anódica, e catódica deste tipo de célula são:



(a) Célula PEM H-TEC [4]



(b) Célula DMFC HYDRO-GENIUS [5]

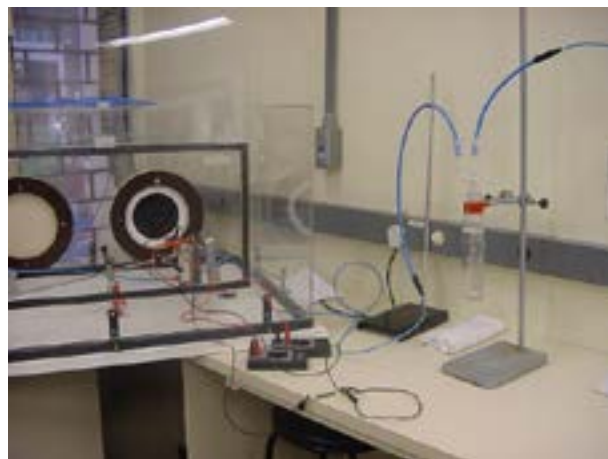
Figura 3: Teste de kits de células a combustível a hidrogênio

4. IMPLEMENTAÇÃO E TESTE DE KITS DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL A HIDROGÊNIO

É descrito em [6] o protótipo do kit implementado na PUCRS visto na figura 4(a), que foi submetido a testes experimentais no LQAmb – Laboratório de Química Ambiental, sendo célula alimentada com hidrogênio ultra-puro conforme ilustra a figura 4(b)..



(a) Kit implementado na PUCRS



(b) Teste do kit no LQAmb

Figura 4: Kit de célula a combustível desenvolvido na PUCRS [6]

Foram realizados adicionalmente em [7], no mesmo laboratório, testes de Protótipos de Células de Combustível com Membrana de Troca de Prótons (PEM) com a Utilização Direta de Metanol tendo sido realizados alguns testes com o etanol.

5. OPERAÇÃO DE MÓDULOS COMERCIAIS DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL DE 1kW

O módulos comerciais Independence 1000 [8], com saída em CC - Corrente Contínua e o módulo Airgen [9] que opera em CA – Corrente Alternada foram colocados em operação com o apoio do SESMT – Setor de Segurança e Medicina do Trabalho. O primeiro módulo operou com o uso do LENAG e o segundo ao ar livre como ilustra a figura 5. Ambos modos de operação foram considerados seguros uma vez que o LENAG possui ventilação por convecção. Os testes foram relatados em [10]



(a) Independence 1000 operando no LENAG



(b) Airgen Ballard operando ao ar livre

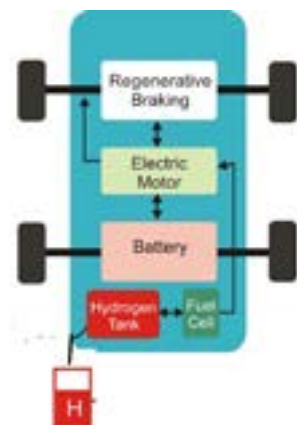
Figura 5: Teste de células a combustível a hidrogênio [10]

6. PERSPECTIVAS FUTURAS E DESAFIOS

Um projeto atual na Iniciação científica, propõe a implementação de um protótipo de um *quadriciclo elétrico* [11] ou FCEV – *Fuel Cell Electric Vehicle*, utilizando a arquitetura clássica ilustrada na figura 6(a) de [12]. O veículo será implementado no LCEE – Laboratório de Conversão Eletromecânica de Energia, usando uma célula a combustível comercial de 1kW disponível no LENAG, um motor elétrico de 1CV com redutor e um chassi cedido pelo orientador. O protótipo

implementado terá uma finalidade puramente didática, e será utilizado no Curso de Certificação de Veículos Elétricos a Bateria e em um futuro curso de certificação que se pretende empreender na Área de Segurança do Hidrogênio. O protótipo não sendo colocado efetivamente em operação. Tendo-se em vista o atual gargalo de segurança do hidrogênio. Iniciativas serão postas em prática, visando definir procedimentos seguros [13], como o da figura 6(b) descrito em [3]

refazer



(a) FCEV [8]

PERMISSÃO DE TRABALHO SEGURO (PTS)

Identificação Única

- 1- Este documento é propriedade exclusiva do usuário (usuário e seus associados)
- 2- Antes de usar o sistema inspecione o local e certifique-se que todos os dados foram fornecidos
- 3- Por motivo de segurança o GNRH não poderá operar em caso de emergência
- 4- O responsável e o operador não deverão assinar se no GNRH ocorrer a sua utilização

Nome: _____ Fls. Início: _____ Fls. Fim: _____
 Assinatura: _____
 Responsável: _____ Assinatura: _____
 Observações: _____

Análise de Riscos

<input type="checkbox"/> Carga excessiva	<input type="checkbox"/> Queda
<input type="checkbox"/> Choque elétrico	<input type="checkbox"/> Incêndio
<input type="checkbox"/> Contato de partes móveis	<input type="checkbox"/> Projeção de peças
<input type="checkbox"/> Danos e gases e vapores	<input type="checkbox"/> Movimento rotacional inesperado
<input type="checkbox"/> Incompleto / Desconhecido	<input type="checkbox"/> Amontoadamento de objetos e equipamentos
<input type="checkbox"/> Escorregão	<input type="checkbox"/> Engavetamento
<input type="checkbox"/> Incêndio	<input type="checkbox"/> Queda

Equipamentos de segurança

<input type="checkbox"/> Cintos de segurança	<input type="checkbox"/> Placa de identificação
<input type="checkbox"/> Protetor facial	<input type="checkbox"/> Surtido de emergência
<input type="checkbox"/> Respirador para gases	<input type="checkbox"/> Sensor de vazamento
<input type="checkbox"/> Máscara	<input type="checkbox"/> Alívio
<input type="checkbox"/> Sinaliz	<input type="checkbox"/> Extintor
<input type="checkbox"/> Luvas	<input type="checkbox"/> Proteção de fumaça
<input type="checkbox"/> Capacete	<input type="checkbox"/> Outros _____

Medidas Preventivas

- Consultar a SESMT - Manual 444
- Inspeção a PTS (Permissão de Trabalho Seguro)
- Analisar o ambiente antes de iniciar o trabalho
- Verificar áreas sinalizadas no sistema
- Atender NR-33
- Cuidados com partes móveis, cabos e estribos
- Utilizar fiação e proteção de estribos
- Proteger líquidos inflamáveis e materiais combustíveis
- Armazenar inflamáveis em local adequado
- Manter fiação e placas sinalizadas de inflamáveis
- Manter circuitos gás no vertical, amarrado, fácil acesso, afastado de combustíveis
- Utilizar as luvas e calçados fornecidos para o trabalho
- Proteger sempre de fumaça e fagulhas
- Identificar e sinalizar as áreas de risco
- O equipamento e instalações estão protegidos
- Presença de um controlador no local
- Fios de trabalho isolados e sinalizados
- Usar fiação longa
- Os equipamentos e sensores utilizados não geram faíscas
- Identificação da local perigosidade
- Temperar cilindros em estado aquecidos
- Não utilizar hidrognio perto de motores aquecidos
- No vazamento devem ser atuados imediatamente
- Observar o sentido do vazamento (de dentro dos registros comerciais)
- Não toque no tubo de combustível enquanto a unidade estiver em funcionamento
- Testes de estanqueidade
- Danos de gases
- Outros _____

(b) Permissão para operação segura com hidrogênio [9]

Figura 6: Perspectivas futuras e desafios

Mediante a análise crítica e para efeito didático, seriam necessários, além da elaboração de protocolos de operação, outros itens obrigatórios como:

6.1. Atualização das instalações

Na forma do que está previsto no Relatório Técnico ABNT ISO/TR 15916:2010, nos itens que forem aplicáveis, buscando a total adequação com vistas a garantir a operação segura. Para tanto, deverão atuar nestes trabalhos, profissionais com a certificação necessária, obedecendo a execução aos mesmos critérios.

6.2. Registro nos órgãos competentes

Após as adequações descritas, devem ser feitos os registros nos Órgãos Competentes, buscando uma condição de operação totalmente segura.

6.3. Treinamento de recursos humanos

O treinamento deve obedecer às diretrizes descritas no Relatório Técnico ABNT ISO/TR 15916:2010.

6.4. Criação de um setor de auditoria interna

Um setor de auditoria interna é obrigatório, devendo incluir profissionais autorizados, devidamente habilitados, qualificados e capacitados para as tarefas experimentais realizadas.

CONCLUSÃO

A importância do estudo e aplicação do hidrogênio é ainda maior, tendo em vista o momento de grandes transformações da humanidade. Pelas suas características de geração, transporte, armazenamento, transformação, e aplicações, o hidrogênio se transforma na grande solução de fonte de energia, que tem as mais variadas formas de utilização. Assim sendo, o momento é propício para

o *desenvolvimento de uma cultura* do seu uso seguro. A segurança é sem sombra de dúvida o gargalo desta técnica. Assim qualquer iniciativa prática e encaminhamento de projetos neste tema deve ter início com base em procedimentos e instalações que garantam a segurança. Desta forma, tão logo o hidrogênio seja incorporado ao cotidiano, certamente trará os efeitos esperados, em termos de sustentabilidade. Dentro deste contexto, iniciativas didáticas no sentido de nortear aspectos fundamentais de segurança no uso experimentação com hidrogênio na universidade, são importantes. A proposição de cursos de certificação alertando sobre aspectos específicos e multidisciplinares na área de conhecimento de segurança do hidrogênio, é o primeiro passo e uma importante contribuição didática da universidade, a seus futuros pesquisadores e utilizadores. A importância da iniciativa em criar o LENAG – Laboratório de Energia e Aplicação de Gases no ano 2003, com o auxílio de pesquisadores multidisciplinares, proporcionou o embrião de outros projetos. Mesmo necessitando de atualizações em função dos anos decorridos, a espinha dorsal do estudo e o aprendizado dos elementos conceituais permanece. Um exemplo de atualização, poderá ser a proposta e implementação de um protótipo conectado à um aplicativo envolvendo um sistema de monitoramento baseado nos mesmos conceitos da avançada engenharia automotiva em termos de segurança ativa e a passiva. Estas tecnologias podem ser incorporadas ao sistema didático do LENAG, com vistas a incrementar a segurança voltada o uso do hidrogênio. Este artigo tem como objetivos, desta forma, ilustrar algumas bases e experiências de utilização do hidrogênio, contribuindo de alguma forma com a base para que estas novas tecnologias possam ser incorporadas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a ANEEL – Agência de Energia Elétrica e CEEE – Companhia Estadual de Energia Elétrica que apoiou o projeto piloto que foi submetido ao edital de Pesquisa e Desenvolvimento. Também ao CNPq e a PUCRS e a Diretoria de Pesquisa de IC – Iniciação Científica, que tem incentivado as pesquisas, proporcionado bolsas de Iniciação Científica destinadas a muitos alunos interessados que têm buscado atuar junto ao Grupo de Energia e Aplicação de Gases do CNPq, certificado pela PUCRS. Finalmente agradecemos aos organizadores do Senafor pelo convite, paciência e incentivo a participação de integrantes do Grupo de Pesquisa de Energia e Aplicação de Gases do CNPq no Renomat.

REFERÊNCIAS

- [1] GOTHE C., O arco-íris do hidrogênio, Disponível em:<<https://pt.linkedin.com/pulse/o-arco-%C3%ADris-do-hidrog%C3%AAnio-carlos-caio-gothe>> Acesso em: 18 abr. 2023.
- [2] CHUG A., TAIBI E., What is Green Hydrogen and why do need it? An Expert Explain, World Economic Forum, 2021
- [3] SOARES, D., Mapeamento das Instalações do LENAG e Aspectos de Segurança na Utilização de Células de Combustível a Hidrogênio, 2012 – Trabalho de Conclusão Orientador – Vicente Mariano Canalli
- [4] PEM H-TEC FUEL CELL MANUAL, Avista Laboratories Inc., Germany
- [5] HYDRO-GENIUS FUEL CELL MANUAL, Avista Laboratories Inc., Germany
- [6] SIMONETTO, H. M. B., Pesquisa e Desenvolvimento de Protótipos de Células a Combustível com Membrana para Troca de Prótons a Hidrogênio, 2006 Dissertação de Mestrado. Orientador: Jose Wagner Maciel Kaheler
- [7] INDEPENDENCE 1000 MANUAL, Avista Laboratories Inc., USA
- [8] AIRGEN MANUAL, Ballard Power System Inc., CANADÁ..
- [9] GAVILLON, J. L., Estudo, Desenvolvimento e Teste de Protótipos de Células de Combustível com Membrana de Troca de Prótons (PEM) com a Utilização Direta de Metanol e Etanol, 2006, Dissertação de Mestrado. Orientador: Jose Wagner Maciel Kaheler
- [10] CANALLI, V. M. Relatório Projeto, Estudo e Aplicação de Células Combustíveis na Geração de Energia, 2005, Projeto de Pesquisa realizado com apoio da ANEEL e CEEE
- [11] (2023) SITE RESEARCHGATE. [Online]. https://www.researchgate.net/figure/Architectural-diagram-of-fuel-cell-electric-vehicles-FCEVs_fig4_354849974

- [12] CANALLI V.M., Estudo e Implementação de Protótipo Didático de um Quadriciclo Elétrico a Hidrogênio - FCEV – *Fuel Cell Electric Vehicle* Projeto BPA PUCRS, 2023
- [13] CANALLI V.M., Teste e Estudo de Segurança de Módulo de Célula a Combustível Aplicável a a Protótipo de veículo Elétrico FCEV – *Fuel Cell Electric Vehicle*, Projeto Chamada Extraordinária BPA PUCRS, 2022



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil

26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de

Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming

Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis

12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

PROTÓTIPO DE BMS – *BATTERY MANAGEMENT SYSTEM* COM MONITORAMENTO REMOTO DA ASSOCIAÇÃO DE CÉLULAS DE LÍLIO

Alberto Lauro Savi Jebram - Autor ⁽¹⁾

Vicente Mariano Canalli - Orientador ⁽²⁾

RESUMO

O balanceamento de carga melhora a vida útil da bateria ao gerenciar corrente de carregamento em um pacote ou *pack* de baterias com múltiplas células conectadas em série, garantido sua utilização segura. Os SGB - Sistemas de Gerenciamento de Baterias ou BMS – *Battery Management Systems*, são utilizados em várias estruturas modernas e comerciais para tornar a atividade da bateria mais eficaz e para avaliar e manter o estado da bateria, tanto quanto possível, longe do estado prejudicial, visando expandir seu tempo de vida útil. Por esta razão, muitos métodos de observação são utilizados para rastrear a condição de carga, temperatura e corrente da bateria. A iniciativa deste trabalho, surgiu da necessidade de se ter uma ferramenta capaz de facilitar o diagnóstico de baterias. É apresentado neste artigo o estudo e idealização de um circuito eletrônico que carrega de forma independente as células de lítio de uma associação série com corrente constante até um patamar de tensão desejado de forma genérica, relacionado com o parâmetro da maioria das células de lítio modelo 18650. O circuito eletrônico implementado fornece uma corrente constante até uma dada tensão de cada célula. Um microcontrolador monitora individualmente as tensões ao longo de um período de cada célula e envia os dados para um *smartphone*, através de um aplicativo. Os dados coletados são registrados em uma planilha na nuvem. Como as células estão ligadas em série a corrente que passa através de cada uma é equivalente. A comparação da variação da tensão ao longo do tempo entre as células da bateria permite indicar alguma anormalidade no sistema formado pela associação.

Palavras Chave: Células de lítio, Associação de células, Recarga de baterias, SGB

⁽¹⁾ Electrical Engineer, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil

⁽²⁾ Prof. Dr. Eng., Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil.

BATTERY MANAGEMENT SYSTEM - BMS PROTOTYPE WITH REMOTE MONITORING OF THE LITHIUM CELL ASSOCIATION

Alberto Lauro Savi Jebram - Autor ⁽¹⁾
Vicente Mariano Canalli - Adviser ⁽²⁾

ABSTRACT

Load balancing improves battery life by managing charging current in a battery pack or battery pack with multiple cells connected in series, ensuring safe use. SGB - Battery Management Systems or BMS - Battery Management Systems, are used in various modern and commercial structures to make the battery activity more efficient and to evaluate and maintain the state of the battery, as much as possible, away from the harmful state, aiming to expand its useful life. For this reason, many observation methods are used to track the charge condition, temperature and current of the battery. The initiative for this work arose from the need to have a tool capable of facilitating the diagnosis of batteries. This article presents the study and idealization of an electronic circuit that independently charges lithium cells in a series association with constant current up to a generically desired voltage level, related to the parameter of most model 18650 lithium cells. The implemented electronic circuit provides a constant current up to a given voltage of each cell. A microcontroller individually monitors the voltages over a period of each cell and sends the data to a smartphone through an application. The collected data is recorded in a spreadsheet in the cloud. As the cells are connected in series the current passing through each is equivalent. Comparing the voltage variation over time between the battery cells allows us to indicate some abnormality in the system formed by the association.

Key words: Lithium cells, Cell association, Battery recharge, BMS

1. INTRODUÇÃO

No mundo atual a energia elétrica é demasiadamente importante, por facilitar o cotidiano de muitas pessoas.

Inúmeros aparelhos tais como *notebooks*, lanternas, carros elétricos e celulares precisam de energia elétrica para operar. Por se tratarem de equipamentos portáteis é necessária uma fonte de energia que os acompanhe enquanto estão em movimento. A principal fonte de energia capaz de dar mobilidade para esses equipamentos são as baterias. Existem inúmeros tipos de bateria fabricadas ao redor do mundo, construídas a partir de diversos materiais. As baterias de fluxo de Vanádio, PB-ácido, Na/NiCl₂ e Lítio/íon são baterias muito utilizadas em diversas aplicações. No comparativo destas quatro baterias a que opera por meio de íons é a que apresenta uma das maiores eficiências, vida útil projetada e densidade de energia.

Apesar destas vantagens uma célula de lítio dificilmente ultrapassa a tensão de 4,2V, dessa forma em diversas aplicações estas células são ligadas em série. Por mais que os fabricantes e células de lítio se esforcem para obter células com parâmetros idênticos entre si, sempre há uma discrepância nos valores de resistência série, capacitância paralela, e indutância entre as células. Estas discrepâncias possibilitam que se associado um fonte de tensão em paralelo a uma associação série, as células de lítio aumentam sua tensão de forma desigual. Para proteger o sistema e aumentar a vida útil destas células quando forem ligadas em série, é empregado em seu

carregamento um circuito capaz de fazer o gerenciamento de carga, denominado de BMS - *Battery Management System*.

O circuito idealizado além do gerenciamento de carga, permite o monitoramento da tensão de cada célula. Através de um microcontrolador e um *smartphone* com recursos como *bluetooth* e *internet*, os dados de tensão durante o carregamento de cada célula podem ser compartilhados em uma planilha na nuvem, proporcionando uma análise individual de cada célula e também uma comparação entre células, ou com um padrão esperado.

Dessa forma em muitas baterias, a identificação de células defeituosas tende a ser um processo mais simples.

2. DIAGRAMA EM BLOCOS DO PROTÓTIPO

Neste trabalho foi idealizado um circuito dissipador de potência em paralelo com cada célula de lítio, com o intuito de evitar sobre tensão sobre cada uma delas, durante o carregamento que utiliza uma associação em série. Assim, no momento em que a tensão da célula ultrapassar o limite especificado, a corrente de carga irá circular pelo circuito dissipador de potência e não mais pela célula.

Além do circuito de controle descrito, foram adicionados blocos para o monitoramento da tensão com o uso de um aplicativo, como ilustra o diagrama em blocos da figura 1.

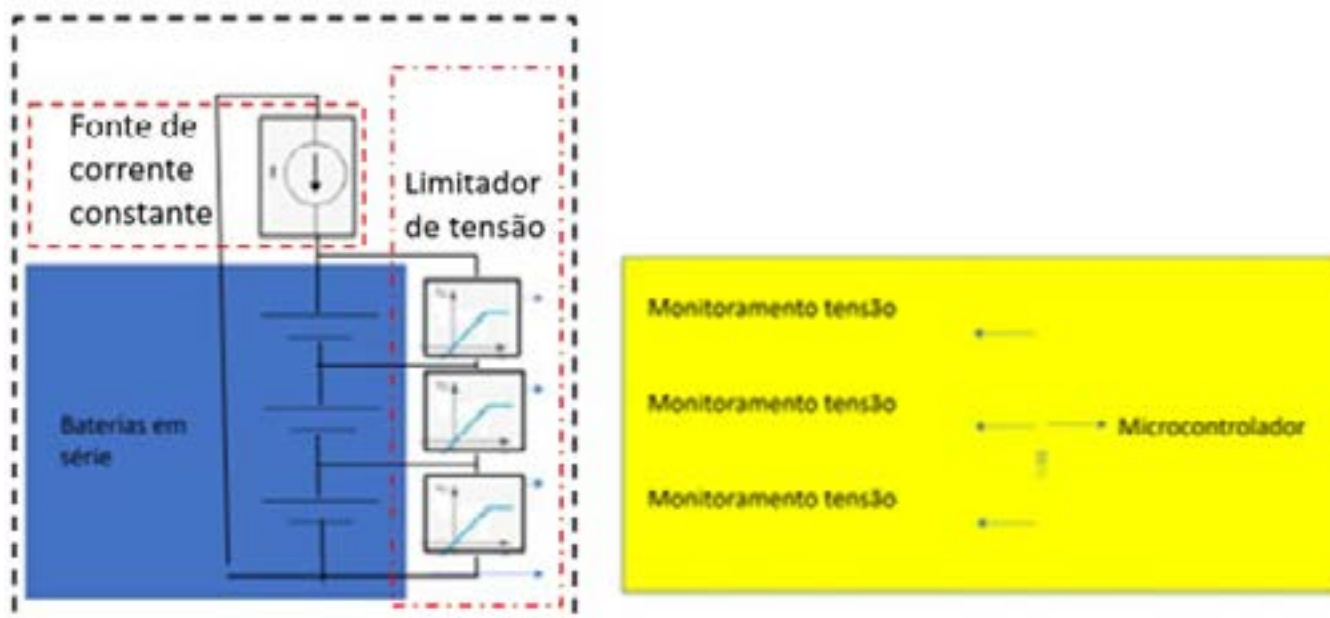


Figura 1: Diagrama em blocos do protótipo [1]

3. CIRCUITO DE CONTROLE IMPLEMENTADO

O circuito de controle implementado neste trabalho é visto na figura 2. Para o carregamento série de três células de lítio é proposto um circuito com três potenciômetros. Com o auxílio de um voltímetro é possível ajustar a tensão máxima de carregamento de cada célula. Neste caso, cada potenciômetro atua como um divisor resistivo e o seu ajuste define a tensão máxima atingida em cada célula.

Quando a célula de lítio chega na sua tensão máxima, a tensão ajustada nos pinos de referência anodo e catodo do circuito regulador, fará com que seja acionado o transistor PNP, de forma que a corrente não circule mais pela célula de lítio, e sim através do circuito dissipador de potência.

No polo positivo de cada célula, são utilizados dois resistores ligados em série e após conectados ao potencial negativo. Os resistores formam divisores de tensão e são dimensionados para que a tensão máxima obtida no carregamento das três células seja de 3,3V, que corresponde ao nível alto logico utilizáveis em um pino de entrada programada do microcontrolador utilizado.

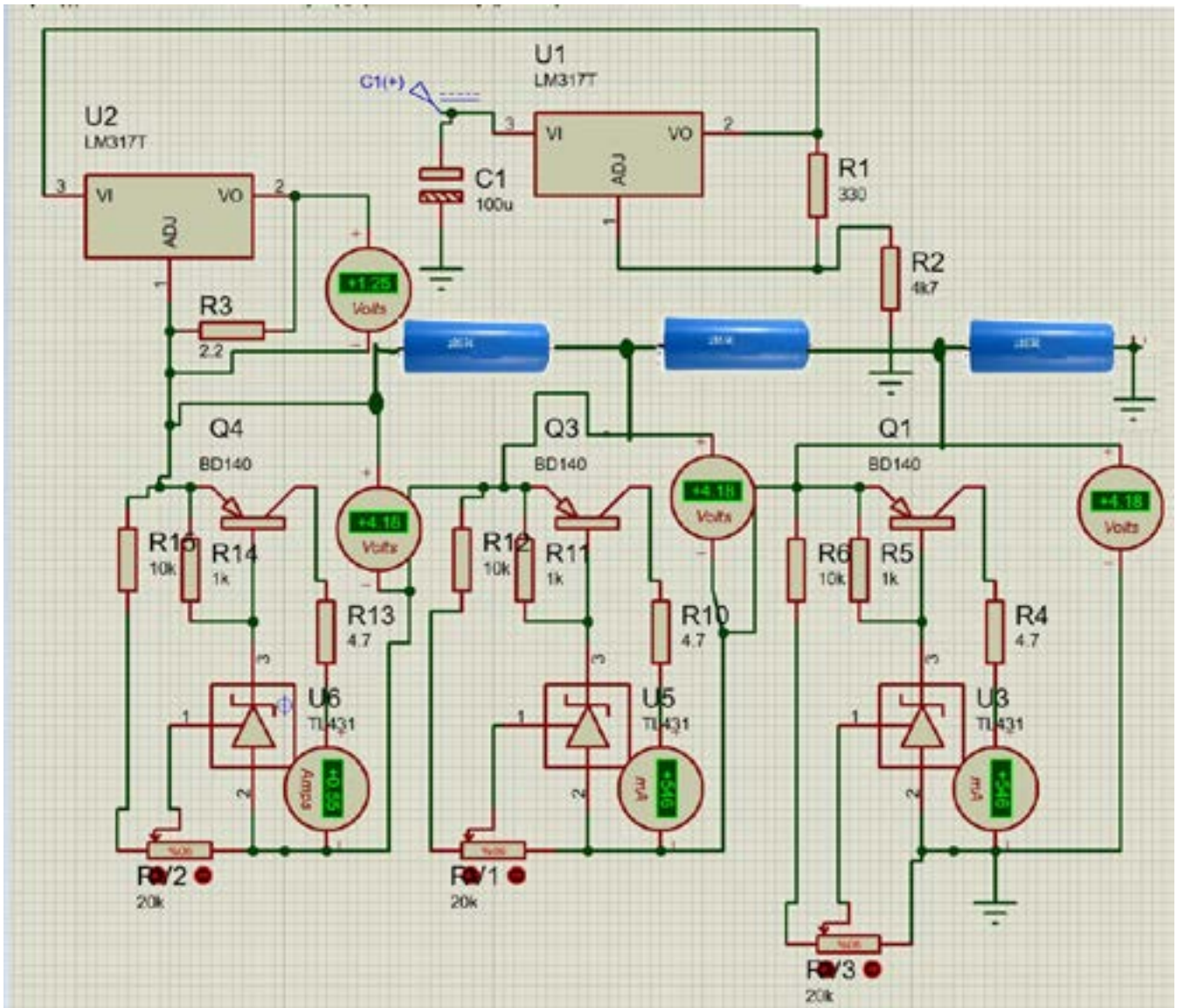


Figura 2: Diagrama do circuito implementado [1]

4. PROGRAMAÇÃO DO MICROCONTROLADOR

A tensão resultante de cada divisor resistivo conectado entre o polo positivo de cada célula e a referência é aplicada a um pino de entrada de um microcontrolador. O microcontrolador é o dispositivo que realiza as leituras de tensão entre cada célula.

Através de uma interface *bluetooth* o microcontrolador se comunica com um dispositivo *smartphone*, que através do acesso internet, coleta os dados recebidos pelo microcontrolador e insere numa planilha na nuvem.

O microcontrolador utilizado para esse fim foi um ESP32WROOM com conversor A/D – Analógico/Digital de 12 bits o que garantiria em teoria uma precisão decimal para a leitura de tensão.

5. DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVO

O desenvolvimento do aplicativo para o celular foi feito utilizando os conceitos de comunicação via *bluetooth* e *ethernet*.

Sua interface foi idealizada com a possibilidade de escolher via microcontrolador a rede a se comunicar, permitindo acompanhar em tempo real tensão em cada célula através do *smartphone*.

Um *slider* foi utilizado para sinalizar a cor verde quando a tensão da célula estiver abaixo de 4V, amarela, entre 4 e 4,2V e vermelha, acima de 4,2V.

A tela do aplicativo no celular, com os *sliders* e a tensão das células indicada, é vista na figura 3.



Figura 3: Tela do aplicativo em uso.

6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Com as leituras das tensões sendo realizadas periodicamente em um intervalo de dez segundos, foi possível representar um gráfico da tensão de cada célula em função do tempo de carga.

A figura 4 ilustra o gráfico relativo ao monitoramento da tensão de uma das células da associação, durante seu carregamento.

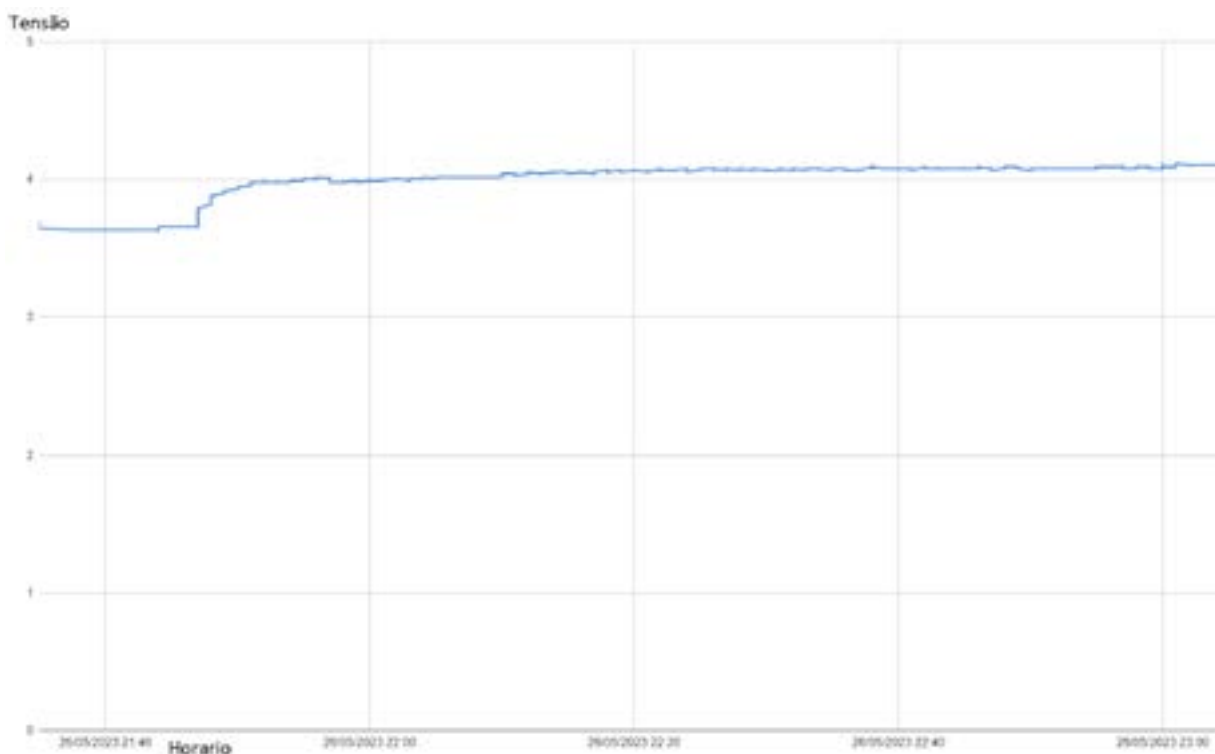


Figura 4: Gráfico do comportamento da tensão no tempo em uma célula

CONCLUSÃO

Neste trabalho foi possível implementar um protótipo capaz de gerenciar o carregamento de uma associação série de baterias lítio-íon. Uma célula de lítio dificilmente ultrapassa a tensão de 4,2V, dessa forma em diversas aplicações comerciais, estas células são associadas em série.

O dispositivo desenvolvido permite controlar a carga da associação fornecendo adicionalmente um relatório acerca do comportamento de cada célula.

O protótipo idealizado pode ser implementado em dispositivos como *notebooks*, que utilizam células de lítio em série, facilitando a identificação de problemas nas baterias e auxiliando especialmente no processo de reparo da unidade composta pela associação.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos organizadores do Senafor pelo convite e incentivo a participação do Grupo de Pesquisa de Energia e Aplicação de Gases do CNPq no Renomat. Também os autores agradecem o apoio da Diretoria de Pesquisa IC - Iniciação Científica pelo resultado de um projeto vinculado ao Programa de IC Voluntário da PUCRS

REFERÊNCIAS

- [1] EUROPEAN COMMISSION, 2012 --- origem da figura 1
- [2] RIEGER, C.; KUHNIMBOF T., Charging infrastructure for electric vehicles: A review of current problems and research efforts. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 132, 831-846., 2020
- [3] SIERZCHULA, W., BAKKER, S., & MAAT, K. The impact of electric vehicle charging infrastructure on the decision to purchase an electric vehicle: A stated preference experiment. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 69, 299-314, 2014.
- [4] DE HOOG, J., ZIETSMAN, J., & RADWAN, E. Analyzing electric vehicle charging infrastructure performance using big data. *Journal of Cleaner Production*, 249, 119261, 2020.
- [5] HUANG, S., ZHANG, H., CHEN, G.. Review of electric vehicle charging infrastructure planning research: Problems and solutions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 421- 435.5 5, 2019
- [6] SOARES, J., RIBEIRO, P., ARAÚJO, M.. Charging infrastructure deployment for electric vehicles: An analytical framework and Portuguese case study. *Transport Policy*, 70, 65-76, 2018.
- [7] JIANG, H., ZHANG, T., LIU, J.. Current challenges and future prospects of electric vehicle charging infrastructure development. *Energy Reports*, 7, 1155-1170, 2021.
- [8] GOMEZ VILCHEZ, J. J., MARTINEZ LOPEZ, R., MARTINEZ RAMOS, J. L. Electric vehicle charging infrastructure planning: A review of models and methods. *Energies*, 12(16), 3077, 2019.
- [9] MARQUES, C., MOURA, F., BORGES, J., SOUSA, T. Electric vehicle charging infrastructure deployment: A review on drivers, impacts and challenges. *Energies*, 13(3), 552, 2020.
- [10] MOUSAVI, A., ROSHANDEL, R. Intelligent management of electric vehicle charging infrastructure: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 315, 128193., 2021.
- [11] LEE, Y. T., PARK, J. W., SON, J. H. Optimal deployment of electric vehicle charging infrastructure considering spatial and temporal charging patterns. *Energy Policy*, 160, 112824, 2022.



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil
26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

POTENCIALIZAÇÃO DOS IMPACTOS DA CONEXÃO DE UNIDADES DE PROCESSAMENTO NO SISTEMA ELÉTRICO

Guilherme Alexandre Karrer - Autor ⁽¹⁾
Anderson Alves Garcia dos Santos - Autor ⁽¹⁾
Caio Collares Meirelles - Autor ⁽¹⁾
Gabriel Rodrigues Mendes - Autor ⁽¹⁾
Mickael Tolotti da Silva - Autor ⁽¹⁾
Rodrigo Alberti Piccini - Autor ⁽¹⁾
Eloy Vicente de La Barra Velasquez - Autor ⁽²⁾
Janaina Longaray dos Santos Autor ⁽²⁾
Lucas Melo Machado - Autor ⁽²⁾
Domingos Malaguez Alves - Autor ⁽³⁾
Dulce Maria Carlos - Autor ⁽³⁾
Gabriel Fabrico Oliveira - Autor ⁽³⁾
Matheus Ferreira - Autor ⁽³⁾
Odilon Pavon Duarte - Autor ⁽⁴⁾
Alexandre Hugo da Silveira - Orientador ⁽⁴⁾
Júlio Cesar Marques de Lima - Orientador ⁽⁴⁾
Milton Machado de Souza - Orientador ⁽⁴⁾
Aquiles Rossoni - Orientador ⁽⁵⁾
Vicente Mariano Canalli - Orientador ⁽⁵⁾

RESUMO

Este projeto foi submetido ao Edital PIBITI de Bolsas de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação - do CNPq tendo recebido uma cota de bolsa. Passou posteriormente para a modalidade de IC - Iniciação Científica Voluntário, recebendo após uma segunda cota de bolsa do CNPq. Em suas três fases acabou integrando diversos pesquisadores e engenheiros de diversas áreas especialmente a de Sistemas de Energia. A aprendizagem propiciada ao bolsista nesta etapa inicial do projeto envolveu a familiarização com temas emergentes importantes na utilização de Energias Renováveis, como o estudo dos impactos da conexão com um sistema de energia. Apoiaram este trabalho estudos teórico-práticos implementados na PUCRS envolvendo temas relacionados a proposição de infraestrutura e idealização de um laboratório pioneiro na América Latina. Os resultados que podem ser obtidos a partir de sua aplicação potencializam os efeitos de conversores eletrônicos, como por exemplo os

carregadores de bateria utilizados na recarga de veículos elétricos, na qualidade de energia do sistema. A importância da infraestrutura proposta está no apoio a trabalhos futuros na pesquisa, sendo que no ensino das disciplinas deverá ser bastante significativa. O trabalho proporcionou também uma familiarização e a verificação de equipamentos e medidores disponíveis nos laboratórios e Ilustração dos principais fenômenos que impactam na qualidade de energia de um sistema. O professor proponente e empresas contatadas pelos bolsistas contribuíram com contrapartidas que vão desde equipamentos até projetos e materiais e serviços para instalação. Assim os estudos teóricos e principalmente a experimentação proposta com a implementação deste laboratório, são justificados como fator primordial na formação dos engenheiros. .

Palavras Chave: Qualidade de Energia, Unidades de Processamento, Laboratório

- (1) Electrical Engineer Student, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil
 (2) Electrical Engineer, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil
 (3) Geinfra, Infrastructure Management of Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil
 (4) Prof. Me., Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil.
 (5) Prof. Dr. Eng., Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil.

ENHANCEMENT OF THE IMPACTS OF THE CONNECTION OF PROCESSING UNITS ON THE ELECTRICAL SYSTEM

Guilherme Alexandre Karrer - Author ⁽¹⁾
 Anderson Alves Garcia dos Santos - Author ⁽¹⁾
 Caio Collares Meirelles - Author ⁽¹⁾
 Gabriel Rodrigues Mendes - Author ⁽¹⁾
 Mickael Tolotti da Silva - Author ⁽¹⁾
 Rodrigo Alberti Piccini - Author ⁽¹⁾
 Eloy Vicente de La Barra Velasquez - Author ⁽²⁾
 Janaina Longaray dos Santos - Author ⁽²⁾
 Lucas Melo Machado - Author ⁽²⁾
 Domingos Malaguez Alves - Author ⁽³⁾
 Dulce Maria Carlos - Author ⁽³⁾
 Gabriel Fabrico Oliveira - Author ⁽³⁾
 Matheus Ferreira - Author ⁽³⁾
 Odilon Pavon Duarte - Author ⁽⁴⁾
 Alexandre Hugo da Silveira - Adviser ⁽⁴⁾
 Júlio Cesar Marques de Lima - Adviser ⁽⁴⁾
 Milton Machado de Souza - Adviser ⁽⁴⁾
 Aquiles Rossoni - Adviser ⁽⁵⁾
 Vicente Mariano Canalli - Adviser ⁽⁵⁾

ABSTRACT

This project was submitted to the PIBITI Public Notice of Initiation Scholarships in Technological Development and Innovation - from CNPq, having received a scholarship quota. He later switched to the modality of CI - Volunteer Scientific Initiation, receiving a second CNPq scholarship. In its three phases, it ended up integrating several researchers and engineers from different areas, especially Energy Systems. The learning provided to the scholarship holder in this initial stage

of the project involved familiarization with important emerging themes in the use of Renewable Energies, such as the study of the impacts of connection to an energy system. This work was supported by theoretical and practical studies implemented at PUCRS involving themes related to the proposition of infrastructure and the idealization of a pioneering laboratory in Latin America. The results that can be obtained from its application enhance the effects of electronic converters, such as battery chargers used to recharge electric vehicles, on the quality of the system's energy. The importance of the proposed infrastructure lies in supporting future work in research, and in the teaching of disciplines it should be quite significant. The work also provided a familiarization and verification of equipment and meters available in the laboratories and illustration of the main phenomena that impact the quality of energy of a system. The proposing professor and companies contacted by the fellows contributed with counterparts ranging from equipment to projects and materials and services for installation. Thus, the theoretical studies and mainly the experimentation proposed with the implementation of this laboratory, are justified as a primordial factor in the training of engineers.

Key words: Power Quality, Processing Units, Laboratory

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda do uso de energia elétrica fez com que fontes geradoras de energias alternativas e hidrelétricas ganhassem espaço no cenário brasileiro. Hoje a principal fonte geradora de energia elétrica brasileira é oriunda de hidrelétricas que representa 61,9% da matriz elétrica brasileira. [1]. Devido ao aquecimento global e as mudanças climáticas foi observado uma diminuição das chuvas em certas regiões do país. Tal diminuição tem acarretado uma baixa nos níveis dos reservatórios de água fazendo com que usinas termoeletricas sejam acionadas para suprir a demanda, por sua vez, provocando a elevação da tarifa das contas de energia dos consumidores devido ao custo mais alto desse tipo de geração. Dado este cenário torna-se necessário diversificar as fontes geradoras. Energia eólica e solar fotovoltaica são opções limpas e viáveis sendo consideradas boas alternativas por causar menos danos ao meio ambiente. Uma UPP - Unidade de Processamento de Potência bidirecional permite processar a energia gerada por fontes alternativas, sendo responsável pela injeção de energia na rede. Na figura 1 ilustra o diagrama em blocos de uma UPP.

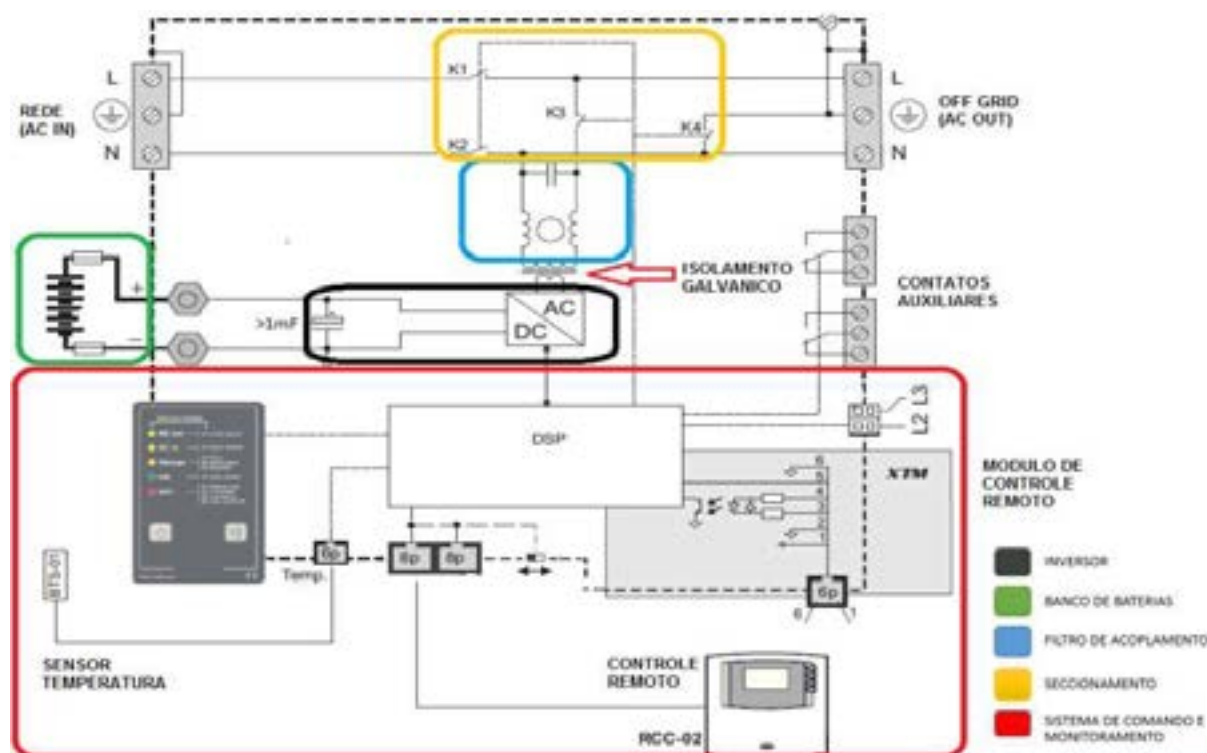
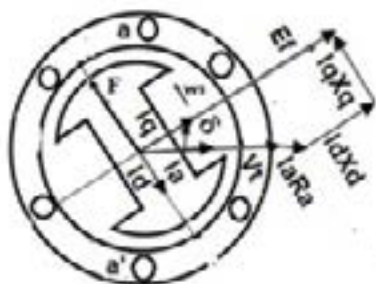


Figura 1: Unidade de processamento de potência [2]

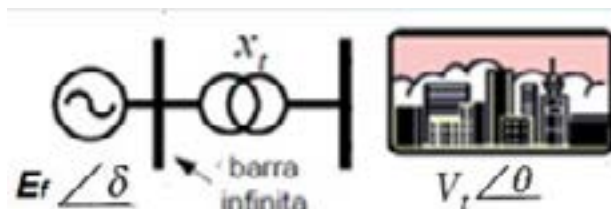
Com alta da utilização de Energias Renováveis interligadas ao sistema de energia elétrica é necessário preparar a rede atual para vários cenários de operação diferentes dos tradicionais, que são

mais dispersivos, envolvendo uma análise precisa de efeitos eletromagnéticos que demandará um elevado esforço computacional. Várias definições são utilizadas para descrever fenômenos eletromagnéticos, relacionados a grandezas como tensão, corrente e frequência, alterando assim a estabilidade e a qualidade da energia elétrica produzida. [3]

As usinas termoeletricas utilizam máquinas síncronas de pólos salientes, como as representadas na figura 1, para a produção de energia no sistema elétrico Destaca-se na figura 2(a) a definição espacial e elétrica do ângulo de carga ou de potência δ . O ângulo delta nos estudos teóricos é um fator que determina o despacho de potência da máquina para o sistema. O conceito de barra infinita [4] está relacionado a ideia de estabilidade na rede. Uma rede é considerada estável quando não há alteração no valor de sua tensão e frequência como acontece em grandes sistemas como o ilustrado na figura 1(b)



(a) Máquina síncrona [5]



(b) Sistema de energia genérico – adaptado de [6]

Figura 2: Máquina síncrona e sistema elétrico de energia

Então um barramento é considerado infinito quando a sua potência é tão grande que acoplado a uma ou múltiplas cargas, este grid não sofre nenhum tipo de instabilidade. Este conceito é frequentemente aplicado ao inserir na rede um gerador de energia elétrica. A rede em questão não altera seu comportamento em função da conexão, ou seja o grid é insensível às cargas.

A barra FINITA ao contrário da barra infinita potencializa fenômenos eletromagnéticos e variações na sua tensão e frequência [7] quando são conectadas cargas que absorvem ou entregam potência no grid.

2. OBJETIVOS DO TRABALHO DESENVOLVIDO

Neste trabalho se está implementando um sistema de energia trifásico do tipo barra FINITA visto na figura 3, que potencialize e possibilite a classificação e análise de formas de onda de distúrbios causados pela conexão de uma unidade de processamento de energia bidirecional, com base em estudos teóricos e resultados de simulação obtidos por *software* PSPICE-ORCAD. [7]

**Figura 3:** Grupo gerador composto uma barra finita

Representa seguramente uma iniciativa pioneira na América Latina e que poderá ser implementada a partir da integração de equipamentos disponibilizados no LCEE – Laboratório de Conversão Eletromecânica de Energia e da montagem de uma usina solar.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta fundamentação teórica, são apresentados conteúdos importantes relacionados ao tema.

3.1 Conceitos de qualidade de energia

O termo Qualidade de Energia Elétrica (QEE) refere-se a fenômenos eletromagnéticos, relacionados a características de tensão, corrente e frequência. Os distúrbios na rede podem ser causados pela concessionária ou pelo consumidor, um distúrbio comumente visto causado pela concessionária é o afundamento de tensão, já pelos consumidores é comum identificar distúrbios relacionados as cargas que geram harmônicos e sobretensões. Na ausência de critérios específicos para analisar a QEE, pode-se relacionar as condições reais de operação com características de um modelo de sistema ideal. Encontrando assim uma escala quantitativa e classificatória para os valores de desvio.

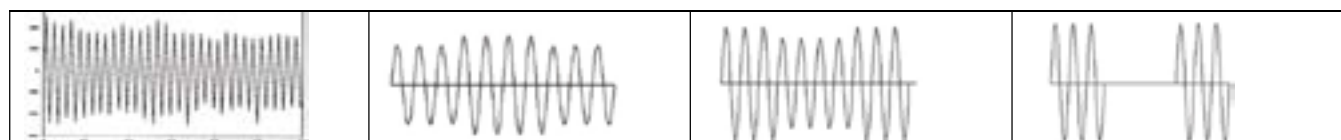
Para a variação de tensão de curta duração (0,5 ciclos a 1 minuto) podem ocorrer:

a) Cintilação (*Flicker*): Quando ocorre uma flutuação da tensão da rede, ou seja, é quando o valor eficaz de tensão sofre variações do em torno do seu valor nominal [20].

b) Salto de tensão (*Swell*): É um estado de sobretensão, um valor eficaz da tensão. Exemplo: saída de grandes cargas, entrada de bancos de capacitores.

c) Depressão de tensão (*Sag*): É uma redução momentânea do valor eficaz de tensão da ordem de 10 % a 90%. Exemplo: entrada de grandes cargas no sistema

d) Interrupção: um decremento da tensão a um valor menor que 10%. As interrupções podem ser resultadas de faltas no sistema elétrico, falhas de equipamentos ou mau funcionamento dos sistemas de controle.



(a) cintilação - *Flicker*

(b) salto - *swell*

(c) depressão - *sag*

(d) interrupção

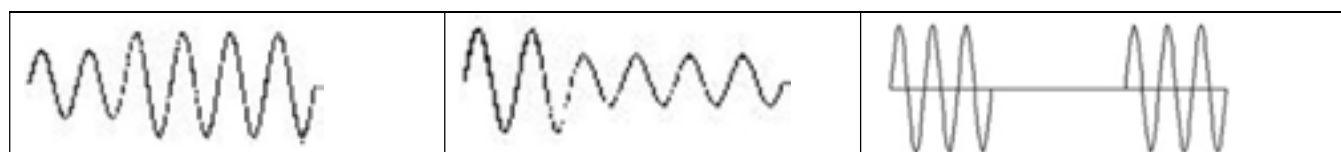
Quadro 1 - Variações de tensão de curta duração (0,5 ciclos a 1 minuto)

Para a variação de tensão de longa duração (maior que 1 minuto) podem ocorrer:

a) Sobretensão: são caracterizadas pelo aumento do valor eficaz da tensão para 110% a 120%. Origem na saída de grandes blocos de carga, entrada de banco de capacitores ou devido ao ajuste incorreto de *taps* de transformadores.

b) Subtensão: representa uma redução no valor eficaz da tensão para 80% a 90%. Provocada pela entrada de carga ou a saída de um banco de capacitores até que os equipamentos de regulação de tensão do sistema atuem.

c) Interrupção: a redução de tensão de suprimento a zero. São de natureza permanente e requerem intervenção manual para restabelecimento da energia elétrica do sistema.



(a) sobretensão

(b) subtensão

(c) interrupção

Quadro 2 - Variações de tensão de longa duração (maior do que 1 minuto).

As distorções da forma de onda do sistema elétrico são:

a) Desvio de nível CC: presença de tensão CC ou corrente CC em sistemas CA. Este fenômeno pode ocorrer devido ao efeito da retificação de meia onda.

b) Distorção Harmônicas: são tensões ou correntes senoidais que têm frequências múltiplas da frequência fundamental (50 Hz ou 60 Hz). Somados às componentes fundamentais de tensão e corrente, os harmônicos causam distorção na forma de onda. Surgem quando ocorre cargas não lineares ligadas ao sistema da rede de distribuição.

c) Interharmônico: São formas de ondas de tensões e correntes que apresentam componentes de frequência que não são múltiplos inteiros da frequência com a qual o sistema é suprido e designado a operar (50 Hz ou 60 Hz). Estas inter-harmônicas podem aparecer como frequências discretas ou como uma larga faixa espectral. As principais fontes são os conversores de frequência estáticos, ciclo-

conversores, motores de indução e equipamentos a arco.

d) Corte (*notch*): é um distúrbio periódico da tensão, causado pela operação normal dos equipamentos que utilizam a eletrônica de potência, quando a corrente é comutada de uma fase para a outra. Durante este período ocorre um curto-circuito momentâneo entre as duas fases. A principal fonte causadora são os conversores trifásicos.

e) Ruído: É uma perturbação aleatória suposta à forma de onda da grandeza elétrica, geralmente compreendida entre 0 a 2 MHz.



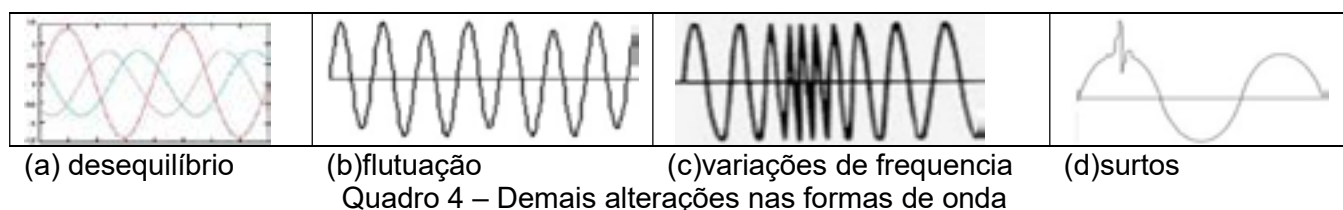
Outros distúrbios que podem ocorrer no sistema elétrico são:

a) Desequilíbrio de tensão: desvio máximo da média das correntes ou tensões trifásicas, dividido pela média das correntes ou tensões trifásicas, expressado em percentual. Geralmente estão nos sistemas de distribuição, os quais possuem cargas monofásicas distribuídas inadequadamente, fazendo surgir no circuito tensões de sequência negativa.

b) Flutuação de tensão: são variações sistemáticas no perfil da tensão ou uma série de variações aleatórias da magnitude da tensão, as quais, normalmente, não excedem o limite especificado de 95% até 105%.

c) Variações na frequência: a frequência está diretamente relacionada à rotação dos geradores do sistema. A frequência depende do balanço entre a carga e a geração disponível. Quando este equilíbrio é alterado, pequenas variações de frequência deverão ocorrer.

d) Surtos: São transitórios de origem atmosférica (descarga elétricas), sendo caracterizado por serem de frequência maior que 5kHz e duração menor que 200 μ s.



3.2 Paralelismo de inversores com o sistema de energia

Para o paralelismo de um inversor com o sistema devemos obedecer à algumas das teorias de circuitos elétricos. Inversores de tensão podem ser vistos como a saída de uma fonte ideal de tensão. Para a conexão em paralelo necessitam ter mesma frequência e amplitude quando forem inversores monofásicos.

Quando esta relação não é atendida podem ser originadas correntes indesejadas circulando ou um desequilíbrio de correntes no circuito. O inversor pode passar a absorver potência ativa e reativa. Estes efeitos além de causarem instabilidade no sistema, podem provocar avarias nos dispositivos ligados à rede. Alguns critérios para avaliar QEE citados no PRODIST (2020) podem ser considerados na análise da qualidade de energia, como, por exemplo:

- O fator de potência deve obedecer ao valor mínimo atual (0,92);
- Presença de distorção na forma de ondas, vistas através da influência de harmônicas e inter harmônicas;
- O desequilíbrio entre fases, porcentagem da sequência negativa e zero em relação a sequência positiva;
- A continuidade do fornecimento, dimensionada através da duração e das interrupções de fornecimento de energia;
- A tensão deve ser regulada próximo aos valores nominais, mesmo com variações de cargas;
- O controle dos limites mínimos e máximos de tensão dos consumidores, e seus limites de frequência de violação quando conectados;
- O balanço de energia entre concessionária e consumidor, para definição da frequência nominal da rede.

4. METODOLOGIA

A figura 4 ilustra a conexão que foi implementada entre o grupo gerador que representa a barra finita e uma carga puramente resistiva, que representa a potência útil consumida em um experimento elementar.

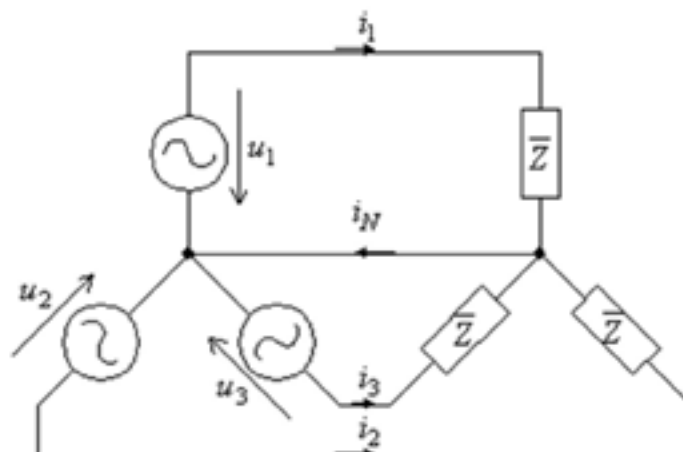


Figura 4: Diagrama de ligação do gerador e da carga resistiva.

Para entregar energia mecânica a uma máquina síncrona de pólos saliente ligada em estrela com campo controlado por fonte independente foi utilizado um motor de corrente contínua. Em uma das fases foi conectado um inversor monofásico. Duas fontes de energia de corrente contínua foram utilizadas na entrada do conversor para simular as placas fotovoltaicas, uma vez que a usina solar ainda não foi implementada. Foi empregado um analisador fluke 434 para coleta dos dados, um tacômetro para acompanhar a rotação do eixo das máquinas, um amperímetro para verificar a corrente na carga e um multímetro gráfico para coletar a tensão e frequência em uma das fases do gerador.

5. INFRAESTRUTURA

O projeto de iniciação científica que foi desenvolvido na Escola Politécnica, prevê a adequação em espaço físico de 25 m², a ser anexado ao LCEE – Laboratório de Conversão Eletromecânica de Energia para instalação de painéis solares recebidos em doação pela empresa DuFrio com atividades de projeto que devem envolver os setores de Arquitetura, Climatização, Elétrica, Luminotécnica e PPCI. Para a configuração do conversor que deverá operar com energia solar e o acompanhamento da quantidade de energia gerada pelo sistema, foi necessária uma conexão com uma rede de dados independente do sistema da universidade como ilustrado na figura 5. Verificou-se então a necessidade de instalação de uma conexão de rede de internet similar a uma rede wifi residencial, que através de um roteador necessita apenas de uma senha para conexão. Neste caso o roteador deve operar na frequência de 2,4 GHz, uma vez que a frequência de 5,0 GHz não é suportada por um dos microinversores.

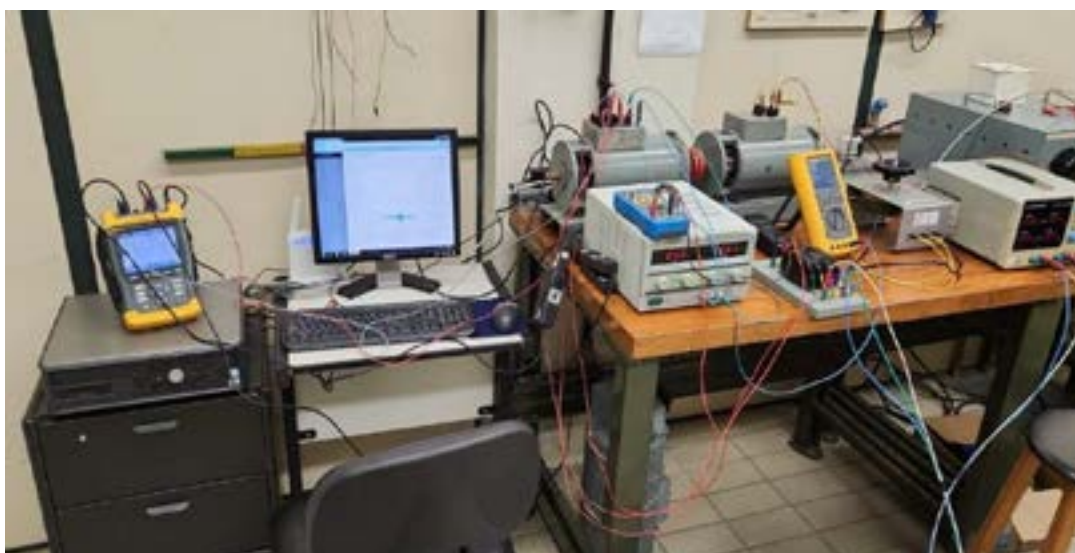
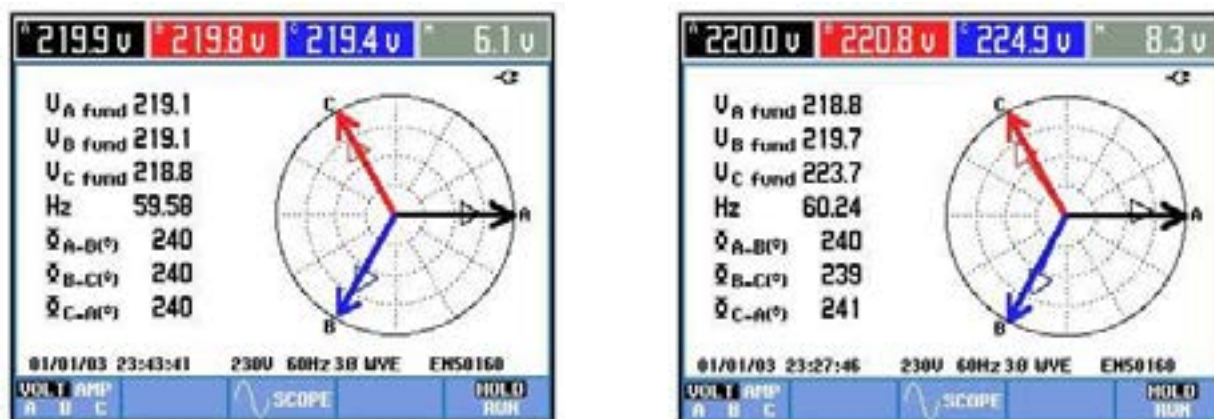


Figura 5: Estrutura computacional que foi agregada à barra finita.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com a figura 6, durante a conexão com a barra finita, o inversor de frequência realizou o sincronismo com a barra, percebendo-se um aumento na rotação da máquina primária, conseqüentemente aumento na frequência do sistema elétrico que precisou ser corrigida para que não houvesse à perda do sincronismo. Além de um desbalanceamento entre as fases, onde a fase C que recebia a conexão do inversor ficou com 4 volts a mais que as demais.

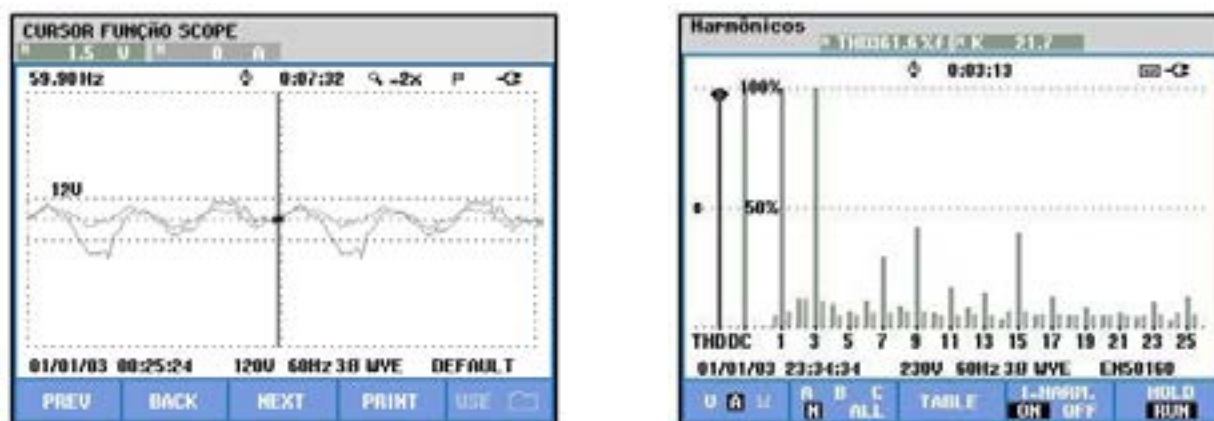


(a) sistema sem o sincronismo do inversor

(b) sistema com o sincronismo do inversor

Figura 6: Sequência de resultados experimentais obtidos durante o processo de sincronismo.

Pelo fato do inversor utilizado ser monofásico e o sistema de energia trifásico verificou-se no condutor neutro, em função do desequilíbrio, uma corrente distorcida e uma incidência de distorção harmônica total de 361% da frequência fundamental, conforme observado na figura 7.



(a) Corrente de neutro

(b) Tensão harmônica no condutor neutro

Figura 7: Resultados experimentais obtidos durante o processo de sincronismo.

7. PROJETO E PREVISÃO DE INSTALAÇÃO E INCORPORAÇÃO DE USINA SOLAR NO SISTEMA

A Geinfra-Gerencia de Infraestrutura da PUCRS tem contribuído com o projeto de uma usina solar que deverá ser incorporada ao projeto com múltiplas finalidades, inclusive a de idealizar um posto de recarga para protótipos de veículos elétricos.

7.1. Processo de infraestrutura

Toda a demanda solicitada é tratada de acordo com processo específico utilizando sistemas corporativos para um controle e acompanhamento do escopo, custo e prazos. O demandante registra os requisitos técnicos para que seja possível desenvolver alternativas e orçamentos preliminares para deliberação quanto ao escopo e custo. A partir da definição da melhor solução, a aprovação dos recursos financeiros e de recursos humanos, são elaborados os projetos técnicos segundo as normas e regulamentos vigentes. A etapa seguinte, de execução, considera a reunião de partida, definição de cronograma da obra, as aquisições de serviços, materiais e equipamentos de acordo com os recursos financeiros liberados. Terminadas as atividades de execução, são instalados os respectivos

equipamentos, na sequência, se realiza o comissionamento para garantir que os requisitos e necessidades do operacionais do cliente estejam de acordo com o previsto, como última etapa se produz um relatório final com o histórico da evolução da obra, relatório fotográfico, o as-built e o resumo dos valores financeiros utilizados. O processo objetiva garantir aos pesquisadores a infraestrutura adequada, no prazo acordado para que possam desenvolver o escopo do projeto de pesquisa

7.3. Projeto arquitetônico

O projeto arquitetônico é desenvolvido considerando os requisitos da planta solar para que possa compatibilizar questões técnicas e ambientais que viabilize a definição do espaço, áreas e volumes, diagramas e croquis possibilitam a organização espacial da nova planta no espaço disponibilizado. Validada uma das alternativas se elabora a documentação técnica que tenha plantas definitivas que contemplem as estruturas de mecânicas, civis, elétricas com detalhamentos, cortes, fachadas, aspectos estéticos, lista de materiais, bem como as aprovações legais e licenças de construção necessárias e prevista na legislação. A execução da obra prevê o planejamento, a reunião de partida, o acompanhamento da obra física, o controle financeiro da parte civil e a elaboração do relatório final

7.2. Projeto elétrico

O projeto elétrico é desenvolvido a partir da definição dos requisitos, finalidade do sistema elétrico, carga elétrica esperada, local da instalação, características arquitetônicas e mecânicas, fontes de alimentação disponíveis, tensão e frequência a ser utilizada, restrições, normas e regulamentos específicos. O cálculo de carga considera fatores como potência, tempo de operação, na sequência se realiza o dimensionamento dos componentes, criação de diagramas e esquemas que representem a distribuição dos circuitos, tipos de conexão, fiação, comandos, cálculo do aterramento de forma a garantir segurança e proteções de forma a garantir o adequado funcionamento dos sistemas contra sobrecargas e curtos-circuitos. Ao final é elaborado a documentação técnica que contemple todos os detalhes de projeto elétrico, lista de materiais, especificações técnicas de tal forma que viabilize a execução em acordo com as normas e regulamentos vigentes.

CONCLUSÃO E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a realização destes testes preliminares, verificou-se de maneira experimental e como esperado, que a conexão de uma unidade de processamento de energia bidirecional ao sistema elétrico contribui para o desbalanceamento entre as fases da rede além de gerar distúrbios e distorções harmônicas. Com o avanço da pesquisa, pretende-se mapear este comportamento em redes com características de cargas distintas a utilizada (capacitiva, indutiva) e realizar o mesmo experimento utilizando conversores com características diferentes da utilizada nesta etapa. O próximo passo será instalar uma usina solar com equipamentos doados pela empresa Dufrio o que possibilitará realizar os próximas análises sem a necessidade de simular com fontes de corrente contínua o funcionamento de placas fotovoltaicas. Todos os aspectos relacionados a inserção de fontes baseadas em inversores são de extremo interesse visto que temos uma tendência ao aumento delas inseridas na rede e as suas consequências e busca por soluções técnicas para compensá-las. Recentemente tivemos atuação de relé de proteção 81 por frequência absoluta no Sistema Interligado Nacional, após a queda de uma linha de transmissão, e uma das linhas de investigação é de que a variação de frequência causada pela redução da inércia sistêmica pode causar a atuação de proteções contra perda de sincronismo de geradores síncronos, por exemplo. Olhando pelo lado das cargas também temos cada vez mais eletrônica embarcada para ser avaliada, quanto aos seus impactos nos sistemas de energia.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela cota de bolsa PIBITI de Bolsas de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação.

À Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul - PUCRS pelo espaço e apoio às iniciativas na realização da pesquisa no papel da Diretoria de Pesquisa de Iniciação Científica.

A Geinfra – Gerência de Infra Estrutura da PUCRS pelo importante apoio prestado.

À empresa Dufrio pela doação de equipamentos que viabilizaram a realização da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (2023) –<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>
- [2] BORBA, Thomas Freitas, Estudo em Blocos e Formas de Onda da Unidade Inversor/Carregador/Transferência Comercial Aplicada a Painéis Fotovoltaicos, - Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Orientador: Vicente Mariano Canalli, 2015.
- [3] PRODIST: modulo 8, Agência Nacional de Energia Elétrica. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Nacional — Qualidade de Energia Elétrica, Brasília: ANEEL 2020.
Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/modulo-8>>.
- [4] CHAPMAN, S. J. Fundamentos de Máquinas Elétricas 5. ed., 2013
- [5] CANALLI V.M. Notas de aula Conversão de Energia II, 2023
- [6] ENADE – Exame Nacional de Cursos, 2002
- [7] DOS SANTOS, Janaina Longaray, Estudo de Caso e Impacto na Qualidade de Energia de um Barramento Trifásico pela Conexão de um Inversor Monofásico, 2020 - Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Orientador: Vicente Mariano Canalli, 2020
- [8] IEEE STD 1159, Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, New York, 2009
- [9] DUGAN, ROGER C., Electrical Power Systems Quality, 2004



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil

26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de

Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming

Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis

12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

USO DE BATERIAS DE LÍTIO FERRO FOSFATO (LiFePO_4) EM EMPILHADEIRAS EM BAIXAS TEMPERATURAS EM AMBIENTES FRIGORÍFICOS

Lucas Melo Machado - Autor ⁽¹⁾

Matheus Chidiac Marchiori - Autor ⁽²⁾

Marçal José Rodrigues Pires - Orientador ⁽³⁾

Vicente Mariano Canalli - Orientador ⁽³⁾

RESUMO

Neste artigo é discutido o uso de empilhadeiras elétricas em ambientes frigoríficos apresenta desafios únicos devido às baixas temperaturas extremas. Neste artigo, discutimos o uso de baterias com células de lítio ferro fosfato (LiFePO_4) para empilhadeiras em tais condições. Avaliamos a capacidade de desempenho, vida útil, segurança e eficiência das baterias LiFePO_4 em baixas temperaturas (0 até -20°C). Além disso, discutimos estratégias de gerenciamento térmico e otimização de desempenho para maximizar a eficiência e minimizar os efeitos adversos das baixas temperaturas. Com base em nossa análise, concluímos que as baterias LiFePO_4 são uma escolha promissora para empilhadeiras em ambientes frigoríficos, oferecendo desempenho confiável e segurança em temperaturas extremas.

Palavras Chave: baterias lítio, células de lítio ferro fosfato, LiFePO_4 , baixas temperaturas, segurança.

⁽¹⁾Electrical Engineer Student, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil

⁽²⁾ Master of Electrical Engineering, Federal University of Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brazil

⁽³⁾ Prof. Dr. Eng., Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil.

USE OF LITHIUM IRON PHOSPHATE (LiFePO₄) BATTERIES FOR FORKLIFTS IN LOW TEMPERATURES IN COLD STORAGE ENVIRONMENTS

Lucas Melo Machado - Author ⁽¹⁾

Matheus Chidiac Marchiori - Author ⁽²⁾

Marçal José Rodrigues Pires – Adviser ⁽³⁾

Vicente Mariano Canalli - Adviser ⁽³⁾

ABSTRACT

The use of electric forklifts in cold storage environments poses unique challenges due to extremely low temperatures. In this article, we discuss the use of Lithium Iron Phosphate Battery (LiFePO₄) cells for forklifts in such conditions. We assess the performance capacity, lifespan, safety, and efficiency of LiFePO₄ batteries in cold temperatures. Additionally, we delve into thermal management strategies and performance optimization to maximize efficiency and minimize the adverse effects of low temperatures. Based on our analysis, we conclude that LiFePO₄ batteries are a promising choice for forklifts in cold storage environments, offering reliable performance and safety in extreme temperatures.

Keywords: lithium batteries, lithium iron phosphate cells, LiFePO₄, low temperatures, safety.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil se destaca como o segundo maior produtor de proteínas do mundo, impulsionando um setor que gera mais de 4 milhões de empregos em todo o país [1]. A logística é uma das peças fundamentais nesse segmento, especialmente quando se trata do transporte e armazenamento de carnes refrigeradas. Uma prática amplamente adotada para garantir benefícios operacionais e ambientais é o uso de empilhadeiras elétricas em ambientes frigoríficos, como armazéns de alimentos e indústrias de congelamento. No entanto, as baixas temperaturas extremas impõem um desafio significativo às baterias convencionais, como as de chumbo-ácido, afetando seu desempenho, vida útil e segurança [2].

Independente do tipo de bateria, todas elas enfrentam perda de capacidade quando expostas a baixas temperaturas. As baterias de chumbo-ácido, por exemplo, apresentam capacidade de energia na faixa de 82% até 91% quando descarregam em temperaturas de até 0°C. No entanto, quando a temperatura baixa para -18°C, sua capacidade cai para uma faixa entre 51% e 61% [3]. Esse cenário traz impactos negativos à eficiência das operações logísticas em ambientes frigoríficos. Nesse contexto, as baterias de lítio ferro fosfato (LiFePO₄) surgem como uma alternativa promissora. Elas têm a capacidade de operar em temperaturas mais baixas, garantindo um desempenho confiável mesmo em condições extremas. A adoção dessas baterias pode representar um avanço significativo para o setor, contribuindo para melhorar a eficiência e a segurança das operações logísticas em ambientes refrigerados.

Portanto, investir em tecnologias mais avançadas, como as baterias de lítio ferro fosfato, pode ser um passo estratégico para o setor de logística de proteínas no Brasil. Além de aprimorar a eficiência e a confiabilidade das operações, essa transição também se alinha com o compromisso ambiental, já que essas baterias são mais sustentáveis e menos impactantes para o meio ambiente. Com essas inovações, o Brasil poderá fortalecer ainda mais sua posição como um dos líderes globais na produção de proteínas e garantir um futuro promissor para o setor.

As células de LiFePO₄ têm atraído considerável atenção devido às suas excelentes propriedades elétricas, estabilidade térmica e desempenho de ciclo de vida prolongado [4]. Compostas por um cátodo de lítio ferro fosfato, um ânodo de grafite e um eletrólito líquido ou sólido, essas baterias

apresentam características únicas que as tornam especialmente adequadas para aplicações em baixas temperaturas. Entre suas vantagens, destacam-se a notável estabilidade térmica, a baixa taxa de autodescarga, a alta eficiência de carga e descarga, bem como uma vida útil mais longa em comparação com outras tecnologias de bateria [5]. Essas características tornam as células de LiFePO₄ uma opção excepcional para aplicações em ambientes refrigerados, como o setor de logística de proteínas, mencionado anteriormente, onde temperaturas extremamente baixas são um desafio para muitos outros tipos de baterias.

Devido a essas propriedades vantajosas, as células de LiFePO₄ têm o potencial de impulsionar a eficiência e a confiabilidade de sistemas de armazenamento de energia e equipamentos em ambientes de baixa temperatura. Seu uso pode representar um avanço significativo em diversas indústrias, proporcionando soluções mais robustas e sustentáveis para os desafios operacionais enfrentados em condições climáticas adversas [6]. Assim, a crescente popularidade dessas baterias é justificada por suas notáveis qualidades e seu potencial impacto positivo em aplicações diversas.

Com o objetivo de simplificar a mitigação dos impactos da temperatura extremamente baixa nas baterias de LiFePO₄, optou-se por conduzir os ensaios utilizando apenas uma única célula de LiFePO₄. Essa abordagem tornou o processo mais viável e simplificado, facilitando a compreensão dos efeitos envolvidos. Contudo, é importante ressaltar que os resultados obtidos podem ser extrapolados para uma configuração de bateria completa, considerando-se os princípios semelhantes que regem o comportamento das células individuais quando integradas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A operação de baterias de íons de lítio em temperaturas baixas apresenta desafios significativos que impactam negativamente seu desempenho. Estes desafios incluem uma redução na capacidade de armazenamento, aumento da resistência interna, diminuição da eficiência e uma vida útil comprometida. Essas limitações têm implicações críticas em setores como transporte elétrico, energia renovável e eletrônica portátil, onde as baterias de íons de lítio desempenham um papel fundamental.

O desempenho das baterias de íons de lítio é particularmente afetado pelas condições ambientais adversas, principalmente em baixas temperaturas, que podem variar de -20 °C a -80 °C. Em um estudo recente envolvendo baterias de íons de lítio com eletrólito convencional a uma temperatura de -40°C, constatou-se que elas retiveram apenas cerca de 20% de sua capacidade nominal [7]. Isso ocorre devido a um fenômeno conhecido como envelhecimento prematuro das células, resultante do processo de degradação severa chamado revestimento de lítio, que é desencadeado pelas descargas da bateria em condições de baixa temperatura, resultando no aumento da impedância [8].

Para enfrentar esses desafios e aumentar a segurança das células das baterias de lítio, diversas normas internacionais foram desenvolvidas. Essas normas estabelecem requisitos que visam a garantir a segurança das baterias em condições de choque térmico, ainda que isso possa comprometer sua eficiência energética. Um desses procedimentos é o ensaio do ciclo de choque térmico, que simula mudanças abruptas de temperatura para avaliar a resistência das baterias a condições extremas.

Existem várias normas que regulamentam esse tipo de ensaio, como a ISO 12405-1-2011, a ISO-12405-2-2012, a IEC 62660-3-2022, a SAE J2464-2021, o SAND2005-3123, a UL 2580-2020 e a GB 38031-2020. Cada uma delas apresenta métodos de ensaio específicos, variando em relação ao estado de carga inicial das baterias, faixas de temperatura e número de ciclos. Por exemplo, alguns ensaios exigem ciclagem térmica entre -40 e 85°C, enquanto outros contemplam diferentes faixas de temperatura e números de ciclos. Além disso, as normas determinam a duração das temperaturas extremas e o tempo de conversão entre elas. O principal objetivo desses ensaios é assegurar que as baterias sejam capazes de operar de forma segura em situações de choque térmico, abordando uma variedade de cenários e condições de ensaio [9].

3. METODOLOGIA DOS ENSAIOS

Neste estudo, foram empregadas células de íon-lítio totalmente carregadas como base para os ensaios de descarga em baixas temperaturas. Com o objetivo de garantir uma avaliação precisa do desempenho das células em condições de frio extremo, foram seguidas as seguintes etapas:

a) Seleção das Células: Foram escolhidas células de LiFePO₄ de alta qualidade e com capacidade nominal de 6Ah, assegurando a uniformidade na amostragem e minimizando variações iniciais entre as células.

b) Preparação das Células: As células foram completamente carregadas até atingirem o estado máximo de carga, com uma tensão de 3,65 V, em conformidade com as especificações do fabricante. Esse procedimento foi executado em condições de temperatura normal de 22°C +/-5°C para garantir resultados confiáveis.

c) Configuração Experimental: As células foram instaladas em um sistema de ensaio especialmente projetado, que permitiu o monitoramento contínuo da tensão, corrente e temperatura durante todo o processo de descarga. Isso viabilizou a coleta de dados precisos para análise.

d) Ensaio de Descarga: Os ensaios de descarga foram realizados em um congelador horizontal padrão de baixa temperatura, atingindo temperaturas inferiores a -20°C. Nesse ambiente, as células foram submetidas a condições de frio extremo, simulando os ambientes frigoríficos aos quais as baterias podem estar sujeitas.

e) Monitoramento e Análise: Durante os ensaios de descarga, os parâmetros elétricos e térmicos foram continuamente registrados. Isso incluiu a medição da tensão das células, a corrente de descarga, a temperatura interna das células e a temperatura ambiente da câmara.

f) Coleta de Dados: Os dados coletados foram registrados e subsequentemente analisados para avaliar o desempenho das células de íon-lítio em diferentes condições de temperatura e níveis de descarga. Os dados de temperatura foram obtidos por meio de um equipamento de monitoramento que utiliza sensores termopar com erro de leitura de +/-2°C. Todos os dados elétricos foram registrados pelo equipamento responsável pela descarga elétrica das baterias, que gerou gráficos ao longo do tempo durante os ensaios.

g) Interpretação dos Resultados: Com base nas análises e comparações realizadas, foi possível extrair conclusões significativas sobre o desempenho das células de íon-lítio em condições de baixa temperatura, além de identificar eventuais limitações e áreas de melhoria.

A utilização de células de íon-lítio totalmente carregadas como ponto de partida para os ensaios de descarga em baixa temperatura proporcionou uma base sólida para a avaliação do comportamento dessas baterias em condições adversas. A metodologia adotada garantiu a confiabilidade e a precisão dos resultados, possibilitando uma análise aprofundada do desempenho das células de LiFePO₄ sob o impacto do frio extremo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o intuito de investigar os impactos resultantes das temperaturas extremamente baixas nas baterias empregadas em empilhadeiras, que utilizam tecnologia LiFePO₄, recorreu-se à utilização de um freezer (EOS, ECOGEL) capaz de atingir a temperatura de -20°C. Isso possibilitou a reprodução das condições típicas de uma câmara fria. Para representar fielmente as baterias empilhadeiras, foi selecionada uma célula específica de LiFePO₄, cujas características são detalhadas na Tabela 1. A adoção dessa estratégia proporcionou uma avaliação mais precisa do desempenho da célula em cenários análogos aos ambientes de operação real.

Tabela 1 - Informações da Célula de LiFePO₄ utilizada nos ensaios.

Parâmetro	Valor
Capacidade Nominal	6,0Ah
Tensão Nominal	3,2 V
Tensão Final de Carga	3,65 V
Tensão Final de Descarga	2,0 V
Temperatura de Carga	0°C até 60°C
Temperatura de Descarga	-20°C até 45°C

Os resultados dos ensaios revelaram variações significativas nas características de descarga das células de LiFePO₄ nas diferentes condições de temperatura. Na temperatura ambiente (22°C), as células apresentaram uma taxa de descarga relativamente estável, com uma perda marginal de capacidade ao longo do tempo. A tensão média de descarga também se manteve consistente (próxima aos 3,0 V).

No entanto, sob temperatura extremamente baixa (-20°C), observou-se uma redução acentuada tanto na capacidade (abaixo de 20%) quanto na tensão das células (abaixo dos 3,0 V). Isso pode ser atribuído às reações químicas mais lentas que ocorrem em temperaturas mais baixas, resultando em uma taxa de descarga diminuída.

Surpreendentemente, quando isolantes térmicos foram introduzidos em temperaturas ambiente, as células apresentaram um desempenho (próximo ao 80% da capacidade) mais próximo ao observado em temperatura ambiente não isolada. Isso sugere que o isolamento térmico foi eficaz em mitigar os efeitos negativos da dissipação térmica e manter as células em uma faixa de temperatura adequada para operação eficiente.

3.1. TEMPERATURA AMBIENTE

Na condição de temperatura ambiente (22°C com variação média de 3°C), a célula de LiFePO₄ apresentou um comportamento de descarga notavelmente estável durante um período de aproximadamente 60 minutos. Durante esse ensaio, foi aplicada uma descarga contínua a uma corrente de 6 ampères, garantindo a utilização da capacidade total da célula. A tensão de descarga demonstrou uma estabilidade considerável ao longo da maior parte do ensaio, mantendo-se em torno de 3,0 V. No entanto, houve uma leve queda inicial de cerca de 350 mV nos primeiros segundos, seguida por uma redução mais acentuada em direção ao final do ensaio, alcançando a tensão de corte de 2,0 V.

Quanto à capacidade das células, observou-se uma perda praticamente insignificante ao longo do experimento, conforme ilustrado no gráfico apresentado na Figura 1

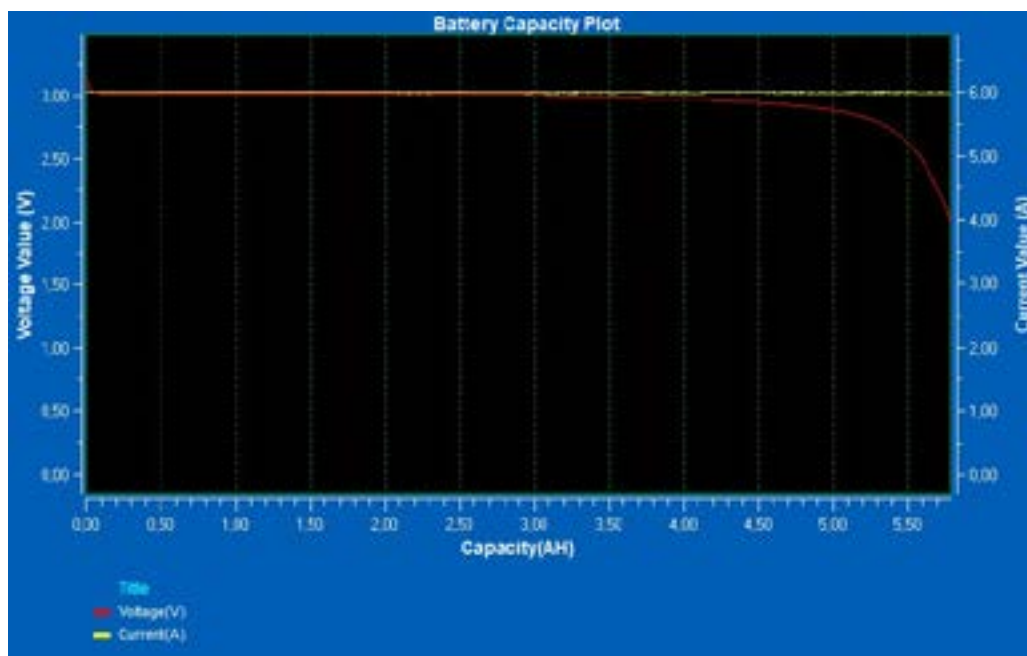


Figura 1 – Gráfico da capacidade das células de LiFePO₄ ao longo do ensaio de descarga em temperatura ambiente (22°C)

. Esse resultado sugere de maneira enfática que a temperatura ambiente favorece uma operação consistente das células, facilitando a ocorrência eficiente das reações eletroquímicas. Além disso, a estabilidade da tensão média de descarga ao longo do ensaio reforça a confiabilidade da operação das células nessa faixa de temperatura.

3.1. TEMPERATURA EXTREMAMENTE BAIXA

Os ensaios em baixas temperaturas foram conduzidos de duas maneiras distintas. Inicialmente, uma célula que estava em temperatura ambiente (22°C) foi submetida a uma condição de extremamente baixa temperatura (-20°C). Imediatamente após alguns ajustes de conexão, o ensaio de descarga elétrica foi iniciado, mantendo as mesmas condições do ensaio anterior. A célula foi descarregada a uma taxa de 1C, ou seja, com uma corrente de descarga contínua de 6 ampères-hora.

No segundo ensaio, uma célula completamente carregada foi inicialmente mantida em temperatura ambiente. Posteriormente, essa célula foi colocada em um congelador para que atingisse a temperatura interna de -20°C. Somente após atingir essa temperatura, a descarga elétrica foi realizada.

Essas abordagens distintas permitiram avaliar o comportamento da célula de duas formas: tanto sob a transição rápida de temperatura de ambiente para baixas temperaturas quanto o comportamento da célula em baixa temperatura.

3.2.1 Ensaio de Transição de Temperatura: Ambiente para Extremamente Baixa

No ensaio que envolveu a rápida mudança de temperatura da condição do ambiente para um ambiente extremamente frio (-20°C), foram notadas observações notáveis. As curvas de desempenho desta transição revelaram uma proximidade com as curvas obtidas no ensaio de descarga a temperatura ambiente. Esse resultado sugere que as células não reagem instantaneamente a essa mudança drástica de temperatura, possivelmente indicando uma certa inércia térmica do sistema.

É importante destacar que, durante o processo de descarga, as células geram calor interno devido à atividade elétrica. Esse aquecimento interno pode ter influenciado no comportamento da célula ao manter a descarga mais próxima da temperatura ambiente. Este fenômeno pode ser visualizado claramente na Figura 2, onde as curvas de tensão durante o processo de descarga permaneceram em uma proximidade notável em relação às curvas obtidas a temperatura ambiente. No entanto, é notável que as curvas apresentaram um desvio abaixo de 3,0 V e esse desvio aumentou de maneira progressiva ao longo do decorrer do ensaio.

Esse resultado sugere que, embora tenha ocorrido uma mudança brusca de temperatura, o calor gerado internamente durante a descarga pode ter atenuado os efeitos dessa transição, permitindo que o desempenho da célula durante a descarga se mantivesse mais alinhado com as características observadas a temperatura ambiente, perdendo apenas 0,5 Ah de capacidade. No entanto, é necessário considerar que outros fatores, como a taxa de aquecimento e a capacidade de dissipação térmica das células, também podem influenciar nessa resposta. A Figura 2 apresenta de forma visual essa relação entre a temperatura e a descarga da célula durante a transição térmica.

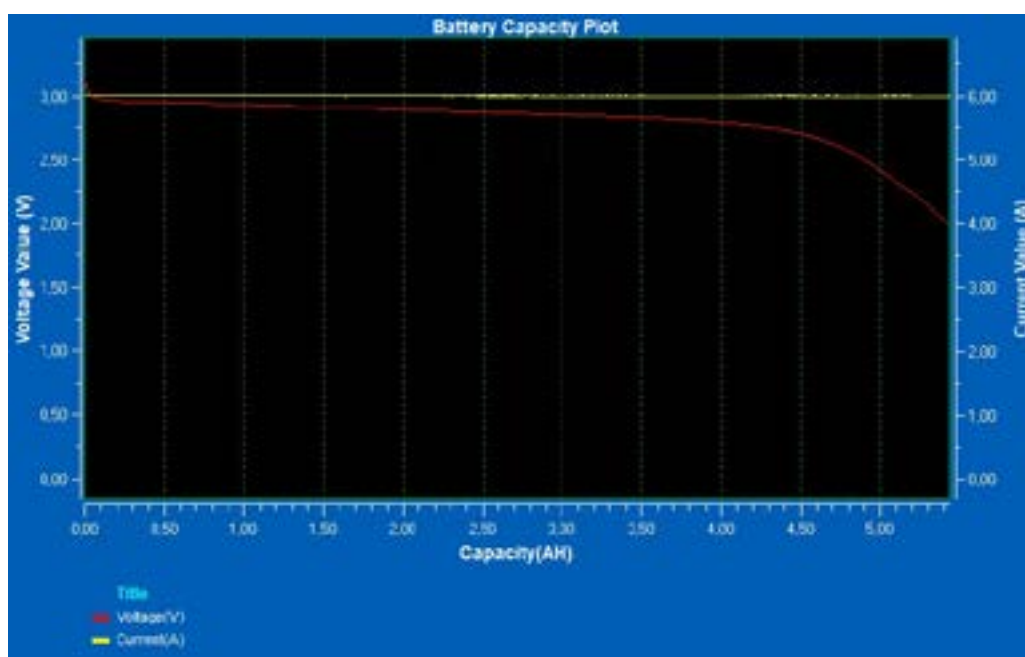


Figura 2 – Gráfico que ilustra a relação entre a temperatura e a descarga da célula durante a

3.2.2 Ensaio de Baixa Temperatura Extrema

Sob as condições extremamente frias de -20°C , as células de LiFePO_4 exibiram uma resposta notavelmente distinta. A capacidade das células sofreu uma diminuição significativa e a taxa de descarga apresentou uma notável redução. Esse comportamento pode ser atribuído às reações químicas que ocorrem em velocidades substancialmente mais lentas em temperaturas mais baixas, levando a uma taxa de descarga mais moderada e, conseqüentemente, a uma perda de capacidade. Além disso, a tensão média de descarga experimentou uma queda, indicando uma eficiência reduzida das reações eletroquímicas sob essa temperatura extrema.

A duração do ensaio foi de aproximadamente 40 minutos, resultando em uma redução de cerca de um quarto da capacidade inicial da célula, a qual ficou ligeiramente acima de 4 ampères-hora. De maneira semelhante ao efeito observado no ensaio anterior relacionado ao aquecimento interno, o mesmo efeito tornou-se evidente aqui. Esse efeito é particularmente notável no ponto final do ensaio, onde é possível observar um amortecimento considerável na curva de tensão final. Essa tendência é claramente ilustrada na Figura 3.

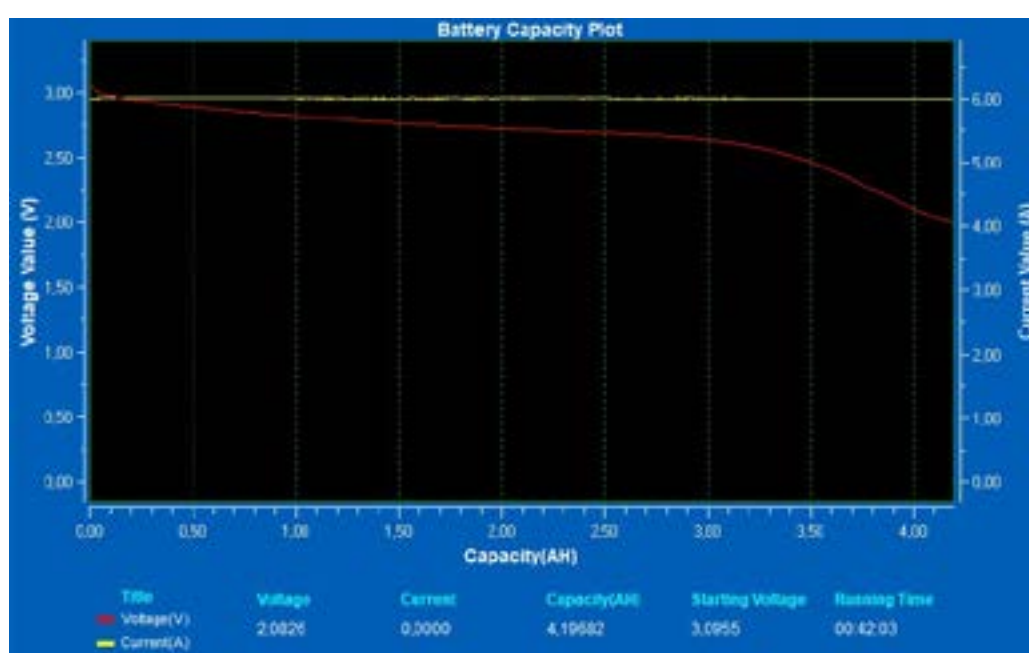


Figura 3 – Gráfico que destaca o efeito de amortecimento na curva de tensão durante o ensaio de baixa temperatura extrema (-20°C)

3.2.3. Ensaio de Extrema Baixa Temperatura com Isolamento Térmico

Com o intuito de mitigar ou atenuar os efeitos adversos da extrema baixa temperatura, um isolamento térmico foi empregado utilizando uma manta de material cerâmico ao redor da célula. Durante o ensaio de descarga, foi notável a significativa alteração no desempenho das células. O isolamento térmico pareceu ter contrabalançado os impactos negativos da temperatura baixa, resultando em um comportamento de descarga mais alinhado com o observado no ensaio sem transição térmica brusca (de temperatura ambiente para baixa temperatura, sem isolamento térmico). A capacidade das células permaneceu relativamente estável, e a taxa de descarga não exibiu variações acentuadas, ficando acima de 5 Ah.

Esse resultado sugere que a aplicação do isolamento térmico foi eficaz em manter as células dentro de uma faixa de temperatura adequada para uma operação eficiente. Isso preservou a taxa de reações eletroquímicas, resultando na conservação da capacidade e da tensão das células. Além disso, é digno de nota o fenômeno das mudanças nas curvas de tensão em relação ao aquecimento interno da célula durante a descarga. Essa tendência é evidenciada na Figura 4, onde se observa a influência do isolamento térmico no perfil de descarga da célula.

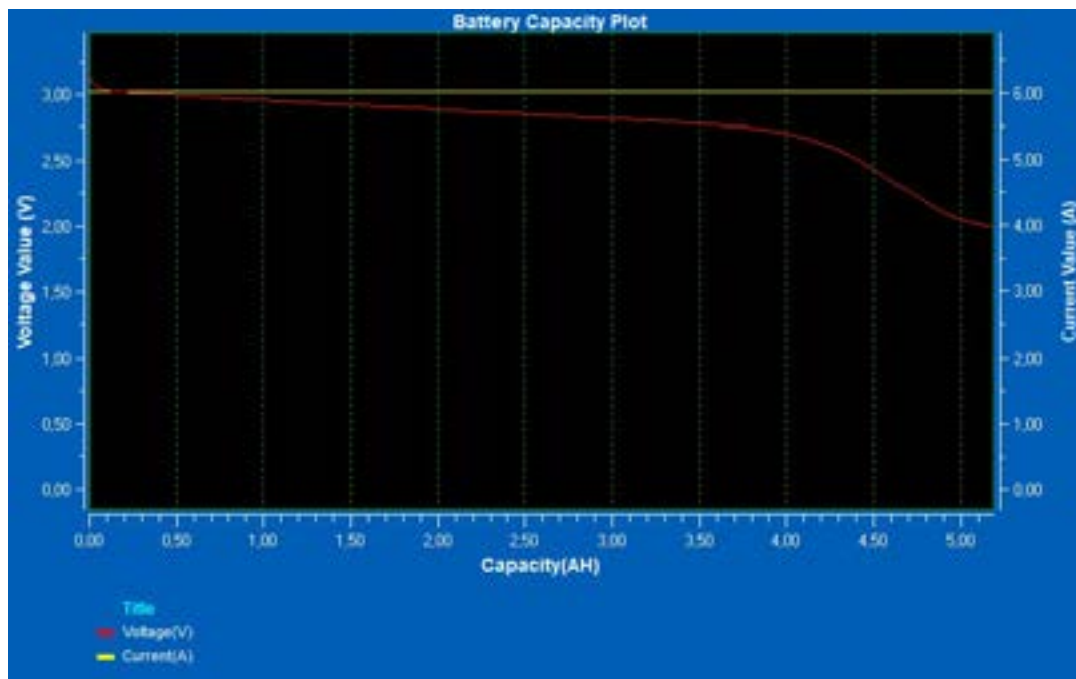


Figura 4 – Gráfico que ilustra as mudanças nas curvas de tensão durante a descarga com isolamento térmico (com variação de -20°C à 10°C)

CONCLUSÃO

Para maximizar o desempenho das baterias LiFePO₄ em ambientes frigoríficos, várias estratégias de gerenciamento térmico podem ser empregadas. Isolamento térmico, aquecimento da bateria, pré-aquecimento antes da operação e controle de temperatura são algumas das abordagens utilizadas para manter a bateria em uma faixa de temperatura ideal. Além disso, a otimização dos ciclos de carga e descarga, ajuste dos parâmetros de carregamento e o uso de algoritmos de controle adequados também contribuem para melhorar a eficiência e prolongar a vida útil das baterias em temperaturas frias.

A segurança é um aspecto crítico a ser considerado no uso de baterias em ambientes frigoríficos. Em baixas temperaturas, algumas baterias podem apresentar menor desempenho e maior risco de falhas, como aumento da taxa de autodescarga e diminuição da capacidade de carga. No entanto, as baterias LiFePO₄ são conhecidas por sua estabilidade e segurança, mesmo em temperaturas extremas.

As baterias de lítio ferro fosfato (LiFePO₄) são uma escolha viável para empilhadeiras em ambientes frigoríficos devido ao seu desempenho confiável, vida útil estendida e segurança em temperaturas extremas. Elas apresentam características superiores em relação a outras tecnologias de bateria em termos de capacidade de carga e descarga, taxa de autodescarga e estabilidade térmica. Estratégias de gerenciamento térmico adequadas, combinadas com a otimização do desempenho e considerações de segurança, podem garantir o funcionamento eficiente e seguro das baterias LiFePO₄ em ambientes frigoríficos.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de expressar nossa sincera gratidão a todas as pessoas e instituições que desempenharam um papel fundamental na realização deste trabalho e na elaboração deste artigo. Sem a colaboração e o apoio dessas partes, a concretização deste projeto teria sido impossível. Queremos estender nossos agradecimentos especiais a:

A GlobalBat Ltda., por fornecer sua infraestrutura e permitir o acesso às células de lítio essenciais para a condução dos ensaios.

A PUCRS, por disponibilizar acesso às instalações e aos recursos necessários para a realização dos ensaios e experimentos cruciais deste estudo.

REFERÊNCIAS

- [1] ABPA, Associação Brasileira de Proteína Animal: Relatório Anual de 2022. link de acesso: <https://abpa-br.org/wp-content/uploads/2023/01/abpa-relatorio-anual-2022.pdf>
- [2] FERREIRA, R. T. Análise da viabilidade econômica da substituição de banco de baterias: chumbo-ácido x Ni-Cd, considerando diferentes temperaturas ambiente. Departamento de Engenharia Elétrica (Egresso) Universidade Federal de Espírito Santo, Vitória - 2021 <https://doi.org/10.53316/sepoc2021.042>
- [3] BAUKNECHT, S.; WÄTZOLD, F.; SCHLÖSSER, A.; KOWAL, J. Comparing the Cold-Cranking Performance of Lead-Acid and Lithium Iron Phosphate Batteries at Temperatures below 0 °C. *Batteries* 2023, 9, 176. <https://doi.org/10.3390/batteries9030176>
- [4] MONHANTY, D.; HUANG, P.-H.; HUNG, I.-M. Preparation and Characterization of a LiFePO₄- Lithium Salt Composite Cathode for All-Solid-State Li-Metal Batteries. *Batteries* 2023, 9, 236. <https://doi.org/10.3390/batteries9040236>
- [5] BABOO, J.P.; YATOO, M.A.; DENT, M.; NAJAFABADI, E. H.; LEKAKOU, C.; SLADE, R.; HINDER, S.J.; WATTS, J.F. Exploring Different Binders for a LiFePO₄ Battery, Battery Testing, Modeling and Simulations. *Energies* 2022, 15, 2332. <https://doi.org/10.3390/en15072332>
- [6] CUI, Y.; SHI, D.; WANG, Z.; MOU, L.; OU, M.; FAN, T.; BI, S.; ZHANG, X.; YU, Z.; FANG, Y. Thermal Runaway Early Warning and Risk Estimation Based on Gas Production Characteristics of Different Types of Lithium-Ion Batteries. *Batteries* 2023, 9, 438. <https://doi.org/10.3390/batteries9090438>
- [7] ZHAN, J.; DENG, Y.; REN, J.; GAO, Y.; LIU, Y.; RAO, S.; LI, W.; GAO, Z. Cell Design for Improving Low-Temperature Performance of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles. *Batteries* 2023, 9, 373. <https://doi.org/10.3390/batteries9070373>
- [8] J. JAGUEMONT, L. BOULON, P. VENET, DUBÉ Y.; SARI A., "Low temperature aging tests for lithium-ion batteries," 2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Buzios, Brazil, 2015, pp. 1284-1289, doi: 10.1109/ISIE.2015.7281657.
- [9] LAI, X.; YAO, J.; JIN, C.; FENG, X.; WANG, H.; XU, C.; ZHENG, Y. A Review of Lithium-Ion Battery Failure Hazards: Test Standards, Accident Analysis, and Safety Suggestions. *Batteries* 2022, 8, 248. <https://doi.org/10.3390/batteries8110248>



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil

26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de

Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming

Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis

12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

VEÍCULOS RODOVIÁRIOS PROPELIDOS A ELETRICIDADE

Jorge Pimentel de Morais - Autor ⁽¹⁾

Gilvani Montenegro dos Santos - Autor ⁽²⁾

Eduardo Tavares Bellanca - Autor ⁽²⁾

Lucas Melo Machado - Autor ⁽²⁾

Matheus Chidiac Marchiori - Autor ⁽²⁾

Paulo Washington de Souza Bastos - Autor ⁽³⁾

Vinícius Cabeda Severo Fraga - Autor ⁽²⁾

Vicente Mariano Canalli - Orientador ⁽⁴⁾

RESUMO

O título deste artigo se relaciona propositadamente à terminologia padronizada utilizada pela ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Neste contexto é oportuno citar a tragédia que envolveu o submersível Titan, utilizado em águas internacionais e que teve como causas o descumprimento dos requisitos legais e normativos. Ao mesmo tempo, um momento histórico, chamado transição energética, surge com alternativas chamadas de fontes de energia limpa, com alterações na matriz energética. O consumo de combustíveis fósseis, característico dos meios de transporte, passa a ser o alvo prioritário deste momento. Nesse contexto, a propulsão elétrica é a alternativa que oferece a maior eficiência energética, envolvendo diversas arquiteturas, como os veículos híbridos, híbridos *plug in*, híbridos com autonomia ampliada e elétricos puros. Os veículos híbridos são uma forma de transição menos radical entre os veículos à propulsão de combustão interna e os veículos elétricos puros. Uma das principais questões que se estabelece é a autonomia das baterias existentes que não estão sendo consideradas como a solução definitiva pelo fato de serem caras e pesadas. A tecnologia do hidrogênio, oferece uma gama de alternativas, onde a célula a combustível proporciona a produção de energia limpa. Em paralelo, surgem os veículos dedicados, também chamados de vocacionados representando um alinhamento aos temas de inovação,

⁽¹⁾ Mechanical Engineer; Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil

⁽²⁾ Electrical Engineer, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil

⁽³⁾ Electrical Engineer Student, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil

⁽³⁾ Prof. Dr. Eng. Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil.

produtividade e eficiência energética, cuja concepção está direcionada ao tipo de aplicação a que se destina. Os VUC – Veículos Urbanos de Carga são caminhões de pequeno porte, com menor distância entre eixos, menor altura ao solo, objetivando otimizar seu deslocamento em grandes centros urbanos. É evidente, que esse mesmo veículo, eletrificado, aumenta ainda mais a sua eficiência, pelo uso urbano proporcionar muitas frenagens regenerativas de energia. Os exemplos de veículos dedicados, vão desde as bicicletas até os veículos extrapesados utilizados em mineração. Neste tema é importante lembrar os conceitos de gestão, onde é avaliado o CTO - Custo Total de Operação, que é a soma das DO – Despesas Operacionais, com as DC – Despesas de Capital. Esse artigo se propõe a fazer uma análise do atual cenário dos transportes, as alternativas existentes, bem como as soluções e novos elementos conceituais relacionados à propulsão dedicada.

Palavras Chave — Veículos elétricos propelidos a eletricidade, veículos vocacionados, veículos dedicados, frenagem regenerativa

ELECTRICITY PROPELLED ROAD VEHICLES

Jorge Pimentel de Morais - Author ⁽¹⁾

Gilvani Montenegro dos Santos - Author ⁽²⁾

Eduardo Tavares Bellanca - Autor ⁽²⁾

Lucas Melo Machado - Author ⁽²⁾

Matheus Chidiac Marchiori - Autor ⁽³⁾

Paulo Washington de Souza Bastos - Author ⁽³⁾

Vinícius Cabeda Severo Fraga - Author ⁽²⁾

Vicente Mariano Canalli - Adviser ⁽⁴⁾

ABSTRACT

The title of this article purposely relates to the standardized terminology used by *ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas*. In this context, it is opportune to mention the tragedy involving the submersible Titan, used in international waters and which was caused by non-compliance with legal and regulatory requirements. At the same time, a historic moment, called energy transition, arises with alternatives called clean energy sources, with changes in the energy matrix. The consumption of fossil fuels, characteristic of means of transport, becomes the priority target at this moment. In this context, electric propulsion is the alternative that offers the greatest energy efficiency, involving different architectures, such as hybrid vehicles, plug-in hybrids, hybrids with extended range and pure electric vehicles. Hybrid vehicles are a less radical form of transition between vehicles powered by internal combustion and pure electric vehicles. One of the main issues that is established is the autonomy of existing batteries that are not being considered as the definitive solution because they are expensive and heavy. Hydrogen technology offers a range of alternatives, where the fuel cell provides clean energy production. At the same time, dedicated vehicles, also called vocationed vehicles, represent an alignment with the themes of innovation, productivity and energy efficiency, whose design is aimed at the type of application for which it is intended. The VUC – Urban Cargo Vehicles are small-sized trucks, with a shorter wheelbase and lower ground clearance, aiming to optimize their displacement in large urban centers. It is evident that this same vehicle, electrified, increases its efficiency even more, as urban use provides a lot of energy regenerative braking. Examples of dedicated vehicles range from bicycles to extra-heavy vehicles used in mining. In this matter, it is important to remember the management concepts, where the TCO – Total Cost of Operation is evaluated, which is the sum of the OE – Operating Expenses, with the CE – Capital Expenses. This article proposes an analysis of the

current transport scenario, the existing alternatives, as well as the solutions and new conceptual elements related to dedicated propulsion.

Keywords — Electric vehicles propelled by electricity, dedicated vehicles, dedicated vehicles, regenerative braking

1. INTRODUÇÃO

Em tempos de mudança na matriz energética, os veículos rodoviários à propulsão elétrica sofreram um incremento na sua demanda. Nesse contexto, a qualificação profissional relacionada não acompanhou a sua implementação, gerando uma carência generalizada.

Pesquisas de opinião no chamado pós-venda refletiu a insatisfação dos proprietários de veículos à propulsão elétrica, no sentido de maiores informações sobre suas diferenças, em relação aos hoje chamados *veículos térmicos*, ou seja, dotados de motores à combustão interna (MCI).

As dificuldades impostas vão desde os novos elementos conceituais envolvidos, até mesmo o uso das tecnologias disponíveis, como o conceito de *seletor de condução e-Toggle* [1], que elimina o pedal do freio, passando o veículo a ter apenas o pedal do acelerador, que quando desacelerado, efetua a frenagem. É neste cenário que foi criado o CURSO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS À BATERIA, dentro do programa de CERTIFICAÇÕES PUCRS, figura 1, cujos conteúdos contemplam uma ampla abordagem multidisciplinar.



Figura 1: Certificação em Veículos Elétricos a Bateria [2].

O processo de criação de um veículo é complexo, partindo do público alvo, nichos de mercado, dimensões, patamar tecnológico, e outros parâmetros definidos pelos fabricantes, onde são cumpridos os Requisitos Legais e Normativos. A partir da Constituição da República Federativa do Brasil, [3] no seu capítulo III – Da Organização do Estado – Artigo 22: Compete privativamente à União legislar sobre: Item XI – Trânsito e Transporte, foi instituído o Código de Trânsito Brasileiro - CTB - através da Lei 9.503, de 23 de setembro de 1997 [4].

O início do processo Legal de um veículo, no Órgão Competente, acontece pela obtenção de seu código marca/modelo/versão, obtido através da sua homologação compulsória [5].

O CTB, no seu Capítulo IX - DOS VEÍCULOS – Artigo 96, fala da classificação dos mesmos: quanto à TRAÇÃO, quanto à ESPÉCIE, e quanto à CATEGORIA.

Já no Artigo 97 são estabelecidas as bases para que um veículo possa ter seu registro no Órgão Competente: *As características dos veículos, suas especificações básicas, configuração e condições essenciais para registro, licenciamento e circulação serão estabelecidas pelo CONTRAN, em função de suas aplicações.*

Assim sendo, a Resolução CONTRAN 916, de 28 de março de 2022: Dispõe sobre a concessão de código de marca/modelo/versão, [6]. Seguindo o cumprimento dos requisitos estabelecidos, a Resolução CONTRAN 993, de 15 de junho de 2023: *Estabelece os equipamentos obrigatórios para a frota de veículos em circulação e relaciona o índice de regulamentações sobre segurança veicular aplicáveis.* Finalizando, o Anexo I do Código de Trânsito Brasileiro, que trata dos Conceitos e Definições.

2.CONTEXTO HISTÓRICO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS DEDICADOS

São muitas as inovações envolvidas na Engenharia Automotiva, dentre as quais o conceito de veículo dedicado, que nada mais é do que um *veículo convencional* adaptado à uma aplicação específica, com uso restrito, e em consequência, muito mais eficiente.

Um bom exemplo são os chamados carros de golfe, muito populares dos USA, onde são percorridas longas distâncias, em função das grandes dimensões de um campo destinado ao esporte. São veículos que chegam a ter compartimentos customizados, em função das dimensões dos equipamentos utilizados na prática do esporte como o carro de golfe visto na figura 2.



Figura 2: Carro de golfe [7]

O conceito de *veículo dedicado* se estende por todo o espectro veicular, indo das bicicletas, passando pelas motocicletas, como ilustra a figura 3



(a)Bicicleta elétrica [8]



(b)Motocicleta elétrica BMW [9]



(c)Quadriciclo TESLA [10]



(d) CITROEN AM AMI BUG [11]



(e)Grilo triciclo carenado [12]



(f)Piaggio cargo [13]

Figura 3: Espectro veicular de bicicleta veículo leve.

O conceito de *veículo dedicado* se estende também a veículos a hidrogênio obtido com a reforma do etanol, até caminhões pesados e extrapesados, como os de mineração como ilustra a figura 4



(a) Toyota Mirai – reforma a vapor de etanol [14]



(b) VW E-Delivery 11 (VUC) [15]



(c) Mineração a hidrogênio [16]

Figura 4: Espectro veicular de veículo com reformador à veículo pesado a hidrogênio.

É importante ressaltar a abordagem do item subsequente, quando se fala dos veículos não sujeitos a homologação compulsória (não cumprimento de requisitos Legais), tendo em vista o veículo ser de circulação restrita (Resolução CONTRAN 916, de 28 de março de 2022, em seu Anexo V).

2.1 Veículos elétricos de uso interno

No caso de condomínios residenciais horizontais, situados em áreas de grandes dimensões, bem como condomínios empresariais, como centros de distribuição de mercadorias, tem-se os veículos chamados de uso interno.

Nos campos de futebol, seguidamente são vistos os veículos customizados, com uma maca na sua lateral, visando facilitar o acesso de atletas lesionados.

2.2 Veículos de circulação restrita

Com referência ao cumprimento dos requisitos Legais estabelecidos pelo Código de Trânsito Brasileiro – CTB, é uma modalidade de veículos licenciados para circular pela via pública, com trajetos restritos. É muito semelhante ao caso dos veículos urbanos de última milha, como o Aplicativo Grilo, o Piaggio Cargo, e o Citroen Ami da figura 3, cujas concepções não estão previstas em Lei. Assim sendo, quando não existe nada que impeça, é permitido.

2.3 Veículo de uso urbano ou de última milha

Nas situações em que o veículo percorre as vias públicas, em trajetos diversos, existe outro tipo de veículo dedicado, que atende parcialmente aos requisitos Legais, como no caso do Aplicativo Grilo, figura 3, com sede em Porto Alegre – RS, onde seu uso pode ser em transporte de cargas ou passageiros, com velocidade limitada, bem como em trajetos restritos. Por utilizar veículos de pequenas dimensões (triciclo com carroceria) e pouco peso, é muito eficiente do seu propósito.

2.4. Importância da avaliação da trajetória desenvolvida pelo veículo dedicado

Em um experimento desenvolvido na PUCRS, um veículo experimental percorre o trajeto de um condomínio próximo à Universidade, ida e volta.

A importância deste experimento é refletir exatamente os métodos utilizados pelos fabricantes de veículos, por ocasião de sua concepção.

A título de exemplo, na figura 5, é apresentada a trajetória percorrida por ocasião da ida e volta a um condomínio residencial próximo até a PUCRS.



(a) Trajeto de ida



(b) Trajeto de retorno

Figura 5: Formas de onda obtidas com o sistema de acionamento operando em bancada [17].

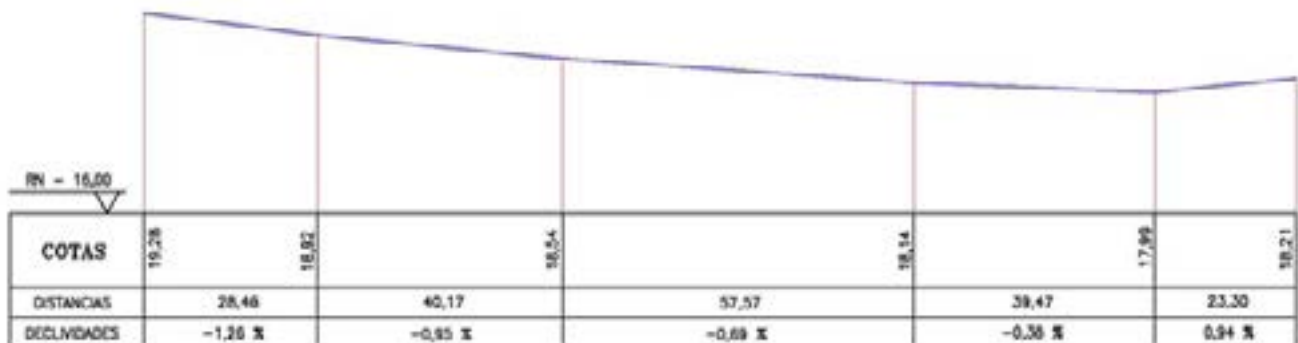
Um levantamento topográfico ilustrado na figura 6(a) e 6(b), permite registrar a trajetória percorrida durante o percurso, além de obter as inclinações percentuais das diversas ruas como exemplificado no perfil longitudinal de uma delas na figura 6(c). Estas informações são de suma importância para definir as características de um veículo elétrico destinado a esta finalidade.



(a) Trajeto de ida



(b) Trajeto de retorno



(c) Perfil longitudinal de uma das ruas contendo as inclinações percentuais

Figura 6: Formas de onda obtidas com o sistema de acionamento operando em bancada [17].

3. ARQUITETURAS DE CUSTO OTIMIZADO

Neste item são descritas algumas estratégias e arquiteturas de uso otimizado que estão sendo desenvolvidas na PUCRS

3.1 Desenvolvimento de *dashboard* comparativo

Uma das questões importantes é o desenvolvimento e aplicação de *dashboard online*, cuja tela é ilustrada na figura 7, com vistas a realização de comparativos de custo entre veículos elétricos (futuramente seus protótipos) e um veículo convencional, considerando-se uma trajetória



Figura 7: Dashboard comparativo online [18]

3.2 Incentivo à Engenharia e ao desenvolvimento de protótipos

O cenário da transição energética oportuniza que o sistema de ensino crie os conteúdos pertinentes aos novos conceitos vigentes, cujas aplicações são vistas na figura.10.



(a) Tricicleta elétrica [19].



(b) Triciclo Elétrico [20].

Figura 8: Veículos elétricos desenvolvidos na PUCRS

Nesta figura é apresentada a *tricicleta elétrica* desenvolvida no projeto [19], que já inclui alguns itens exigidos para veículos de circulação em vias públicas, conforme a recente Resolução CONTRAN 993, de 15 de junho de 2023, que estabelece os equipamentos obrigatórios, bem como a regulamentação sobre segurança veicular aplicáveis.

4. VANTAGENS VISLUMBRADAS

Conforme a já citada Resolução CONTRAN 993/23, existem itens diferenciados, que são exigidos conforme a aplicação do veículo, Artigo 97 do CTB: *As características dos veículos, suas especificações básicas, configuração e condições essenciais para registro, licenciamento e circulação serão estabelecidas pelo CONTRAN, em função de suas aplicações.*

Os referidos itens constam do Anexo I da referida Resolução.

O recente fenômeno vivenciado na França, por ocasião do lançamento do veículo CITROEN AMI [11] da figura 3, trouxe de volta uma polêmica estabelecida por ocasião da chegada do Aplicativo UBER, que criou o serviço de transporte individual de passageiros, sem que fosse criado o vínculo de emprego com os condutores (prestadores de serviços).

No caso, não havia a Previsão Legal, para o exercício desta profissão.

Da mesma forma, o veículo CITROEN AMI trouxe uma questão não prevista em lei, pois é considerado um *quadriciclo com carroceria*. Assim sendo, se vislumbra um nicho de mercado para os chamados veículos dedicados.

4.1 Implementação simplificada do veículo

Com base na abordagem do item anterior, foram criados novos tipos de veículos, cujas aplicações podem ter os Requisitos Legais e Normativos simplificados, baixando os custos e aumentando a sua eficiência. Baseado no fato de que o que não é proibido, é permitido, existe a possibilidade do uso disseminado destes veículos, além do custo reduzido, pela sua eficiência.

4.2 Menores custos de aquisição.

A simplificação das exigências Legais tem uma implicação direta nos custos, favorecendo a aquisição dos veículos.

4.3. Popularização dos benefícios

Na sequência, temos uma popularização dos veículos à propulsão elétrica, permitindo às populações antes privadas do acesso aos mesmos, facilitando a mobilidade urbana.

4.4 Redução e melhor previsão de riscos

A segurança veicular é um aspecto de grande relevância, e está contemplada quando são cumpridos os Requisitos Legais e Normativos. Assim sendo trata-se de mais um item a favorecer o uso destes veículos.

4.5. Disponibilidade de infraestrutura e de normas para teste de motores elétricos

Hoje no Brasil os Requisitos de Avaliação da Conformidade por exemplo, para Motores Elétricos Trifásicos de Indução Rotor Gaiola de Esquilo são definidos na Portaria Inmetro nº 290, de 7 de Julho de 2021. A avaliação da conformidade é realizada por meio do mecanismo da declaração do fornecedor e engloba motores nas potências nominais de 0,12 kW (0,16 cv) à 370 kW (500 cv) nas polaridades de dois, quatro, seis e oito polos. O Nível de eficiência energética exigido para tais motores é o classe IR3 ou rendimento *Premium* e foi estabelecido na Portaria Interministerial nº 1 de 29 de Junho de 2017. As normativa envolvida na realização dos ensaios são a ABNT NBR 17094-1:2018 Máquinas Elétricas Girantes. Parte 1: Motores de indução trifásicos e os requisitos para os ensaios são descritos na ABNT NBR 17094-3:2018 Máquinas Elétricas Girantes. Parte 3: Motores de indução trifásicos. Dentre os métodos e ensaios previstos na portaria Inmetro 290/2021 destacam-se o ensaio de rendimento; ensaio de fator de potência e a inspeção visual das marcações obrigatórias. Na figura 9 é ilustrado um exemplo de setup para realização destes ensaios realizado no LABELO – Laboratórios Especializados em Eletroeletrônica da PUCRS



Figura 9: Setup para realização de ensaio de máquina elétrica no LABELO [21].

4.6 Homologação simplificada

Considerando a complexidade do processo de Homologação Veicular, já descrito [5], o procedimento simplificado facilitaria a implementação dos novos elementos conceituais aqui trazidos, bem como teria um efeito-cascata nos demais, como a legalização facilitada e a implantação pulverizada.

4.7 Legalização facilitada

Na mesma linha argumentativa, a simplificação das exigências Legais e Normativas facilitaria a legalização dos veículos dotados de novas tecnologias, aplicadas às circunstâncias específicas já descritas, muitas delas já em prática em diversos países.

4.8 Implantação pulverizada

Como consequência da homologação simplificada e legalização facilitada, a implantação dos veículos dotados de novos conceitos, certamente atenderia à muitas demandas reprimidas, pulverizando seu uso.

4.9. Recarga rápida

Considerando a arquitetura veicular dos veículos dedicados, seu peso, suas dimensões, seu consumo energético é significativamente mais baixo, exigindo baterias menores, e em consequência, tempo de recarga também menor.

4.10 Compatibilidade com fontes de energias renováveis

A partir de um menor consumo energético, estes veículos podem utilizar as mais variadas formas de fontes de energia, dentro do conceito de geração distribuída, que é mais um conceito adotado na transição energética, dos painéis solares, mini geradores eólicos, e células de combustível.

4.11 Redução de impactos no sistema elétrico

Finalizando, a aplicação de todos os conceitos descritos teria como consequência uma menor demanda do sistema elétrico, diminuindo o número de apagões que se tem sofrido.

4.12 Aplicação mediata no cenário universitário e regionalizada com vantagens

Projetos de veículos dedicados de baixa potência poderiam circular dentro da PUCRS, tendo em vista as baixas velocidades no campus. Por outro lado, a extensa faixa litorânea brasileira se caracteriza por um perfil topográfico plano e por altos índices de incidência solar e com ventos fortes e na maioria das cidades com um tráfego não muito intenso. Esta região pode se beneficiar muito com veículos deste estilo. Tecnologias de materiais leves e resistentes a corrosão, podem originar protótipos que permitam comportar, por exemplo, painéis solares representando uma aplicação direta das energias renováveis conforme [7].

4.13 Solidariedade aos animais e uma esperança a utilizadores e prestadores de serviços

A opção por veículos dedicados, traz ainda consigo um apelo de solidariedade aos animais que sofrem e ainda um projeto de esperança e de prestação de serviços por parte de seus utilizadores, como descrito em [7].

CONCLUSÃO

O presente artigo tem por objetivo trazer o novo cenário mundial, que se estabeleceu por ocasião da transição energética. São muitos os novos elementos conceituais a considerar, e em uma breve classificação, onde estão os veículos, seus variados meios de propulsão, bem como suas fontes de energia. A questão inicial está relacionada ao cumprimento dos Requisitos Legais, cujas Leis e Regulamentos não se atualizaram, impedindo que as muitas inovações possam ser aplicadas, como no caso do veículo Citroen Ami, na França, cuja concepção não está contemplada nas leis vigentes, e assim, não pode ser exigida a carteira de habilitação. Já no Brasil, o Aplicativo Grilo tem dificuldades com o Governo de São Paulo, que não permitiu a sua circulação em vias públicas urbanas. Tão logo as questões de ordem Legal sejam solucionadas, estes veículos, também chamados de dedicados, trarão uma grande contribuição para a mobilidade urbana sustentável. Ainda falando sobre os objetivos deste trabalho, os meios de propulsão veicular, onde os motores elétricos têm na sua eficiência energética, um fator decisivo em relação aos térmicos. Finalizando, as fontes de energia,

onde se depara com as mais nobres inovações, iniciadas pelas baterias de alta densidade energética, e chegando agora às células de combustível, que podem ser consideradas o estado da arte, em termos de arquiteturas de propulsão veicular. Neste contexto, importante salientar a experiência que está em andamento no Brasil, onde o veículo Toyota Miray *Fuel Cell* abastecido com etanol está sendo considerado um dos veículos mais limpo do mundo.

AGRADECIMENTO

Agradecemos o apoio dos técnicos Paulo Cesar Marques, pelo apoio na questão de levantamentos topográficos. Agradecimento ao Prof. Dr. Eng. Vicente Mariano Canalli, por sua incansável ajuda, colocando seu grande legado à disposição do Grupo de Pesquisa de Energia e Aplicação de Gases do CNPq, com grande senso colaborativo.

REFERÊNCIAS

- [1] (2023) SITE CONEXAOTO [Online], <https://conexaoto.com.br/2023/02/12/peugeot-segue-eletrificando-seus-modelos-no-brasil>
- [2] SETOR DE COMUNICAÇÃO - ESCOLA POLITÉCNICA PUCRS, Certificação em Veículos Elétricos a Bateria, 2023
- [3] (2023) SITE CONSTITUIÇÃO DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL [Online]. <http://www4.planalto.gov.br/legislacao/portal-legis/legislacao-1/codigos-1>
- [4] (2023) SITE LEI 9503 [Online]. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9503.htm
- [5] (2023) SITE NOTÍCIAS AUTOMOTIVAS [Online]. <https://www.noticiasautomotivas.com.br/entenda-como-e-feita-a-homologacao-de-veiculos-no-brasil/>
- [6] (2023) SITE CONTRAN [Online]. <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/resolucoes-contran>
- [7] (2023) SITE CARRO DE GOLFE [Online]. https://www.hdkexpress.com/seating-with-space-and-room-for-everyone-product/?keyword=carrinhos%20de%20golfe&82E75F5AF5D2D01C&matchtype=p&gclid=CjwKCAjwivemBhBhEiwAJxNWN50dN3-QU6KxDdZng4JjX7JGPKhu6quutd2jY3ePY5G4VYKYj3pLWxoCfKQAvD_BwE
- [8] (2023) SITE LOJAGTSM1 https://www.lojagtsm1.com.br/bicicletas/eletrica/bicicleta-eletrica-aro-29-gts-m1-hmountain-freio-a-disco-7-marchas-e-amortecedor-gts-m1-eletrica-hmountain-360-wh-10ah?parceiro=4377&parceiro=4377&gad=1&gclid=CjwKCAjwivemBhBhEiwAJxNWN0BtwxEb9XJJIVkbvxzHh_QM-jXWjxAr9tBPkM7M8fpR_DO1eJdbxxoCaKkQAvD_BwE&variant_id=14309https://www.noticiasautomotivas.com.br/bmw-ce-02-nao-e-moto-nem-scooter-o-que-e-entao/
- [9] (2023) SITE BMW [Online]. <https://www.noticiasautomotivas.com.br/bmw-ce-02-nao-e-moto-nem-scooter-o-que-e-entao/>
- [10] (2023) SITE TESLA [Online]. https://quatorrodas.abril.com.br/noticias/quadriciclo-eletrico-da-tesla-custa-r-8-000-e-vira-febre-na-china/?fbclid=IwAR1nhGnnQU9_PP6scNzdySVtYypTJ005NpeF6vltLYnlbDK7OM4K9sUTzRc
- [11] (2023) SITE CITROEN MY AMI BUG [Online]. <https://www.carscoops.com/2023/06/citroen-my-ami-buggy-sold-out-in-just-10-hours/#Echobox=1687428734>
- [12] (2023) SITE GRILLO MOBILIDADE - TRICICLO CARENADO [Online]. <https://www.grilomobilidade.com/>
- [13] (2023) SITE PIAGGIO CARGO [Online]. <https://?????>
- [14] (2023) SITE TOYOTA MIRAI REFORMA A VAPOR ETANOL [Online]. <https://quatorrodas.abril.com.br/carros-eletricos/impressoes-toyota-mirai-e-carro-a-hidrogenio-ainda-mais-limpo-no-brasil>
- [15] (2023) SITE VW E-DELIVERY 11 (VUC)L [Online] <https://insideevs.uol.com.br/news/517292/caminhao-eletrico-volkswagen-edelivery-ambev/>
- [16] (2023) SITE MINERAÇÃO A HIDROGÊNIO [Online]. https://thedriven.io/2023/07/27/fortescue-rolls-out-3mw-fast-charger-as-it-trials-huge-electric-and-hydrogen-haul-trucks/?fbclid=IwAR2nUZ0skC7mBfcKIU_5J9AN8IMS9UE_HjuDx6zD84X9IQ_DEKZl7ijzDSMBQ
- [17] CANALLI, V.M., DE AZEREDO, N.L.; Relatório Projeto Guarda-Chuva na Linha de Veículos Elétricos: Protótipos, Adaptação, Logística e Infraestrutura de Testes 2021 - 2023. 16p.
- [18] FRAGA V.C.S – *Dashboard* com Atualização Online em Power Bi para Análise Econômica Comparativa Preliminar de um Veículo Elétrico Frente ao seu Modelo à Combustão - Trabalho de Conclusão PUCRS – Orientador Prof Vicente Canalli, 2023
- [19] CANALLI, V.M, BASTOS P.W.S, MONSON V.; Projeto Guarda-Chuva na Linha de Veículos Elétricos: Protótipos, - Tricicleta Elétrica – Fase II – Orientador Prof. Vicente Mariano Canalli, 2023. 16p
- [20] BELLANCA, E.T.. Triciclo Elétrico Desenvolvido para o MCT – Museu de Ciencia e Tecnologia da PUCRS
- [21] LABELO - DOS SANTOS G.M. Infraestrutura de teste de motores elétricos.



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil

26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de

Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming

Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis

12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

TRANSFORMANDO O FUTURO DA MOBILIDADE: UMA JORNADA ELETRIZANTE PELAS INSTALAÇÕES DE CARREGADORES

Paulo Washington Souza Bastos - Autor ⁽¹⁾

Vicente Mariano Canalli - Orientador ⁽²⁾

RESUMO

Com a crescente preocupação com as mudanças climáticas e a busca por alternativas sustentáveis, a mobilidade elétrica tem se tornado uma realidade cada vez mais presente. Nesse contexto, a infraestrutura de carregamento para veículos elétricos desempenha um papel fundamental na viabilidade e aceitação dessa tecnologia. Este artigo científico explora o cenário atual das instalações de carregadores para veículos elétricos e discute as principais inovações e desafios nessa área. Além disso, são apresentados estudos de caso de países que têm se destacado na implantação de uma infraestrutura eficiente e abrangente de carregamento, analisando suas estratégias, benefícios e impactos na transição para uma mobilidade mais sustentável. Por fim, são discutidas as perspectivas futuras e as medidas necessárias para impulsionar ainda mais a adoção de veículos elétricos e o desenvolvimento de instalações de carregamento inovadoras.

Palavras Chave: Veículos elétricos, Mudanças climáticas, Mobilidade sustentável

⁽¹⁾ Automation Control Engineer Student, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil

⁽²⁾ Prof. Dr. Eng., Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil.

TRANSFORMING THE FUTURE OF MOBILITY: AN ELECTRICAL JOURNEY THROUGH CHARGING FACILITIES

Paulo Washington Souza Bastos - Autor ⁽¹⁾

Vicente Mariano Canalli - Adviser ⁽²⁾

ABSTRACT

With the growing concern about climate change and the search for sustainable alternatives, electric mobility has become an increasingly present reality. In this context, the charging infrastructure for electric vehicles plays a key role in the viability and acceptance of this technology. This article explores the current scenario of electric vehicle charger installations and discusses the main innovations and challenges in this area. In addition, case studies of countries that have stood out in the implementation of an efficient and comprehensive charging infrastructure are presented, analyzing their strategies, benefits and impacts in the transition to a sustainable mobility. Finally, future prospects and measures needed to further drive the adoption of electric vehicles and the development of innovative charging facilities are discussed.

Key words: Electric vehicles, Climate change, Sustainable mobility

1. INTRODUÇÃO

A transição para veículos elétricos tem sido impulsionada pela necessidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis e mitigar os efeitos negativos das emissões de gases de efeito estufa no meio ambiente. A infraestrutura de carregamento desempenha um papel crucial nessa transição, pois é responsável por fornecer a energia necessária para abastecer os veículos elétricos.

Neste artigo, é explorada a importância das instalações de carregadores para carros elétricos e seu impacto na mobilidade sustentável.

2. ESTADO ATUAL DAS INSTALAÇÕES DE CARREGADORES PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS

Nesta seção dedicada à análise do estado corrente das infraestruturas de carregamento, uma análise de dados quantitativos permite uma compreensão mais precisa da realidade vigente. A distribuição geográfica das estações de carregamento é pontuada com detalhes sobre a densidade de carregadores em distintas áreas urbanas e suburbanas. O balanço da Associação Brasileira do Veículo Elétrico - ABVE, feito em conjunto com a Tupinambá Energia, empresa de soluções inteligentes para veículos elétricos, aponta que existem, no País, 17 carros por carregador. Na Europa, a média é de 10 veículos; e, nos Estados Unidos, 12 [1]. Aparentemente, a quantidade não é ruim, em comparação a mercados onde o veículo elétrico se encontra mais desenvolvido. A distribuição dos *eletropostos* no Brasil é muito desigual. Está a contento nas regiões Sul e Sudeste, mas piora demais no Norte e no Nordeste. Estima-se que o Brasil chegará de 4.500 a 5.000 unidades até meados de 2024. Para que isso se torne realidade, ações e parcerias de empresas estão em curso. Essa análise aclara por exemplo, como as cidades densamente povoadas apresentam uma maior quantidade de estações de carregamento, como na capital do estado de São Paulo e sua Região metropolitana que apresenta o maior número de carregadores instalados no Brasil, enquanto áreas rurais ainda estão em processo de desenvolvimento, pois nestes locais essa tecnologia é vista como uma tendência que não foi validada. É certo que, muitas pessoas tem medo de empreender uma viagem sem volta, analisando do ponto de vista que não vislumbram carregadores nestas localidades. A variação na capacidade de carregamento também é examinada, destacando-se as diferenças entre carregadores de nível 1 (portáteis normalmente ligados em tomadas simples de 20A mas podendo chegar até potências de 22kW), nível 2 (wallbox-carregadores de potências que variam de 3,6kW a 22kW em corrente AC) e os de alta potência em nível DC (com potências de 40kW até 300kW), todos estes proporcionam tempos de recarga diferentes. Dados empíricos são apresentados

quanto às taxas de carregamento atingidas, demonstrando como, em média, carregadores de alta potência proporcionam uma taxa mais rápida de recarga em comparação com os níveis mais baixos. Além disso, a discussão se aprofunda nos desafios encontrados, como a infraestrutura insuficiente, traduzida em municípios que evidenciam a discrepância entre o número de veículos elétricos e o número de estações de carregamento disponíveis. A incompatibilidade entre carregadores de diferentes fabricantes é explorada na prática, pois em casos exemplificados são utilizados adaptadores em casos de incompatibilidade de conectores de diferentes partes do mundo. A chamada por um padrão global para a comunicação entre veículos e estações de carregamento é reforçada por argumentos quantitativos, que demonstram como a falta de padronização prejudica a experiência dos usuários e a eficiência geral do sistema. Em conjunto, esses fatos tangíveis e quantitativos fornecem uma análise substancialmente mais enriquecida e informada do cenário das infraestruturas de carregamento, agregando rigor e precisão às discussões sobre o desenvolvimento contínuo e a superação dos desafios nesta área vital da mobilidade elétrica.

3. INOVAÇÕES EM INSTALAÇÕES DE CARRREGADORES

No cenário dinâmico das tecnologias automotivas, uma área que tem testemunhado avanços impressionantes é a das instalações de carregamento para carros elétricos. À medida que a demanda por veículos elétricos continua a crescer, a indústria está focando no desenvolvimento de soluções inovadoras que facilitem o carregamento rápido, eficiente e conveniente desses veículos. Nesse contexto, diversas inovações recentes e tecnologias emergentes estão moldando o futuro da infraestrutura de carregamento.

Uma inovação importante reside nos carregadores de alta potência, que buscam reduzir significativamente o tempo de carregamento. A capacidade de fornecer energia de maneira mais rápida é fundamental para superar a preocupação com a autonomia limitada, permitindo que os motoristas recarreguem seus veículos em minutos, em vez de horas. Carregadores de alta potência, muitas vezes baseados em tecnologias de carregamento rápido como CCS - Combined Charging System ou CHAdeMO que é o nome de uma tecnologia de carregamento em corrente contínua projetada para veículos elétricos e da organização encarregada de desenvolvê-la. As tecnologias utilizadas, estão se tornando uma peça fundamental nas estações de carregamento, proporcionando ao final uma experiência de recarga rápida e prática.

Outra vertente empolgante é a evolução dos sistemas de carregamento sem fio. Essa tecnologia está progredindo a passos largos, buscando eliminar a necessidade de cabos para conectar os veículos à fonte de energia. Sistemas de carregamento sem fio, como os baseados em indução magnética, estão sendo projetados para permitir que os motoristas simplesmente estacionem seus carros sobre uma superfície de carregamento e o processo de recarga seja iniciado automaticamente. Essa abordagem simplificada não apenas reduz o esforço do usuário, mas também tem o potencial de integrar-se perfeitamente em ambientes urbanos, como estacionamentos públicos e garagens residenciais.

A integração inteligente de carregadores elétricos em infraestruturas urbanas é uma visão que está se tornando realidade. A adaptação criativa de postes de iluminação pública e outros elementos urbanos para incluir pontos de carregamento é uma maneira engenhosa de aproveitar a infraestrutura existente para atender às necessidades de mobilidade elétrica. Essa abordagem não apenas otimiza o uso do espaço urbano, mas também oferece pontos de carregamento convenientes em áreas de alto tráfego, contribuindo para a expansão da rede de recarga.

Além disso, as soluções inteligentes de gerenciamento de carga estão emergindo como uma ferramenta vital para otimizar o uso da energia e alocar eficientemente os recursos de carregamento. Com a capacidade de monitorar a demanda, os sistemas de gerenciamento de carga podem distribuir dinamicamente a energia disponível para evitar sobrecargas e garantir que vários veículos sejam atendidos simultaneamente. Isso não apenas impede gargalos de carregamento, mas também contribui para uma distribuição uniforme da energia nas redes elétricas [2]. Em suma, as inovações recentes e as tecnologias emergentes nas instalações de carregamento para carros elétricos estão moldando uma era empolgante de mobilidade sustentável. Os avanços nos carregadores de alta potência, os sistemas de carregamento sem fio, a integração em infraestruturas urbanas e as soluções inteligentes de gerenciamento de carga estão convergindo para criar uma infraestrutura de carregamento mais eficiente, conveniente e escalável.

À medida que se continua testemunhando essa revolução na indústria automotiva, é evidente que a infraestrutura de carregamento está se adaptando rapidamente para atender às demandas da próxima geração de veículos elétricos.

4. ESTUDOS DE CASO: PAÍSES LÍDERES NA IMPLANTAÇÃO DE INFRAESTRUTURA DE CARGA

Nesta seção, são descritos de forma resumida estudos de caso de países que têm se destacado na implementação de uma infraestrutura robusta de carregamento para carros elétricos. Esses estudos de caso não apenas fornecem uma visão abrangente das estratégias bem-sucedidas empregadas, mas também revelam como iniciativas governamentais, parcerias público-privadas e incentivos têm desempenhado um papel crucial no avanço da adoção de veículos elétricos e na expansão das instalações de carregamento. Países como a Noruega, Alemanha, Holanda e China se destacam como modelos exemplares na criação de uma rede de carregadores ampla, acessível e eficiente, e vamos examinar de perto os benefícios e impactos positivos dessas iniciativas.

4.1 Noruega: pioneira na adoção de veículos elétricos.

A Noruega emergiu como uma líder indiscutível na adoção de veículos elétricos e na criação de uma infraestrutura de carregamento impressionante. Estratégias inovadoras combinadas com uma forte colaboração entre o governo e a indústria foram fundamentais para esse sucesso. Incentivos financeiros significativos, como isenções de impostos e pedágios, além de estacionamento gratuito, têm incentivado os noruegueses a adotar veículos elétricos em grande escala. Além disso, a expansão agressiva da rede de carregamento público, que inclui estações de carregamento rápido e normal, tornou o carregamento conveniente e acessível em todo o país. Como resultado, a Noruega testemunhou uma participação impressionante de veículos elétricos nas vendas totais de automóveis, reduzindo significativamente as emissões de carbono e melhorando a qualidade do ar.

4.2 A Alemanha: líder em *eletromobilidade* no velho continente.

A Alemanha anunciou uma verdadeira ofensiva para ampliar a infraestrutura de carregamento e adoção de carros elétricos na maior economia da Europa. *"O nosso objetivo é acelerar a expansão da infraestrutura de carregamento, simplificar o processo de carregamento e facilitar a transição para o carro elétrico. A mobilidade sustentável cresce rapidamente, por isso temos de ser rápidos também"*. Estas são as palavras de Volker Wissing, Ministro Federal dos Transportes da Alemanha, ao apresentar o último pacote de iniciativas lançado por Berlim para encorajar o *boom* ou expansão rápida e muito abrangente dos carros elétricos a bateria. A começar pelos pontos de carregamento, que receberão um financiamento de 6,3 bilhões de euros em três anos. Os fundos irão para novos pontos de carregamento, que verão os números crescer até 14 vezes, dos atuais 70.000 para 1.000.000 em 2030, pelo menos de acordo com os planos. As novas infraestruturas se concentrarão principalmente em municípios com poucas ou nenhuma estação.

4.3 Holanda: integração inteligente em espaços urbanos

A Holanda se destacou pela forma inteligente como incorporou a infraestrutura de carregamento nas cidades. Uma abordagem inovadora envolveu a integração de estações de carregamento em postes de iluminação pública, estacionamentos e locais de trabalho. Essa integração cuidadosamente planejada não apenas aproveitou o espaço existente, mas também tornou o carregamento parte do tecido urbano. Além disso, a colaboração entre o governo, empresas de energia e fabricantes de veículos elétricos resultou em uma rede de carregamento abrangente e confiável. Incentivos generosos, como subsídios na compra de veículos elétricos e benefícios fiscais, solidificaram a adoção desses veículos no país. A Holanda se destaca como um exemplo de como a integração inteligente pode criar uma experiência de carregamento perfeitamente harmonizada com a vida urbana.

4.4 China: ambição e investimento em escala

A China tem demonstrado uma abordagem ambiciosa para a mobilidade elétrica, buscando não apenas expandir a infraestrutura de carregamento, mas também impulsionar a produção de veículos elétricos. O governo chinês investiu pesadamente na construção de uma vasta rede de carregamento, que inclui tanto estações de carregamento rápidas quanto convencionais. Essas estações estão espalhadas por cidades, rodovias e áreas rurais, tornando o carregamento acessível em todo o país. Incentivos substanciais, como subsídios para compra de veículos elétricos e isenções de impostos, estimularam um crescimento expressivo no mercado de veículos elétricos na China. Além disso, regulamentações rigorosas visam impulsionar a adoção de veículos de baixa emissão e acelerar a

transição para a mobilidade elétrica. Esses estudos de caso revelam o impacto positivo das estratégias abrangentes de implantação de infraestrutura de carregamento para carros elétricos. A combinação de incentivos, parcerias colaborativas e abordagens inovadoras resultou em redes de carregamento eficientes e abrangentes, impulsionando a adoção de veículos elétricos e contribuindo para a redução das emissões de carbono. À medida que mais países buscam seguir esses modelos bem-sucedidos, fica claro que a criação de uma infraestrutura de carregamento robusta é essencial para alcançar uma mobilidade mais sustentável e uma transição bem-sucedida para o futuro dos veículos elétricos [3].

5. PERSPECTIVAS FUTURAS E DESAFIOS

Nesta seção, será abordado o horizonte promissor das instalações de carregamento para carros elétricos, explorando as tendências emergentes e os desafios à medida que se avança rumo a um futuro mais eletrificado e sustentável. Por este motivo é essencial que os engenheiros entendam as dinâmicas em jogo para antecipar soluções eficazes e viáveis.

5.1 Carregamento rápido de alta potência: rumo à eficiência máxima

Uma das tendências mais marcantes é a busca contínua pelo carregamento rápido de alta potência. Como os veículos elétricos ganham uma maior popularidade, a demanda por tempos de carregamento mais curtos se intensifica. Carregadores de alta potência, capazes de fornecer quantidades significativas de energia em minutos, estão se tornando a espinha dorsal da infraestrutura de carregamento. A implementação bem-sucedida desses carregadores depende de uma abordagem sistêmica, incluindo melhorias em baterias, sistemas de refrigeração e interfaces de carregamento, garantindo que a entrega de energia ocorra de maneira segura e eficiente.

5.2 Integração com fontes de energia renovável: sustentabilidade em foco

Uma perspectiva vital para o futuro das instalações de carregamento é a integração com fontes de energia renovável. A busca por uma mobilidade verdadeiramente sustentável exige que os carros elétricos sejam carregados com energia limpa. A interconexão de estações de carregamento com painéis solares, turbinas eólicas e outras fontes renováveis é uma estratégia motivadora. Permite não apenas reduzir o impacto das emissões de carbono pela erradicação dos veículos elétricos, mas também ajuda a equilibrar as flutuações na oferta e demanda de energia, criando um sistema mais resiliente e ecologicamente correto.

5.3 Redes inteligentes de energia: orquestrando a carga e a demanda

O desenvolvimento de redes inteligentes de energia, também conhecidas como *smart grids*, está ganhando destaque como uma solução para a gestão eficiente da recarga. Essas redes permitem uma comunicação bidirecional entre carregadores, veículos e infraestrutura elétrica. Isso significa que os veículos podem não apenas receber a energia, mas também devolvê-la à rede em momentos de pico. Essa capacidade de ajustar a carga com base nas demandas em tempo real contribui para a estabilidade da rede elétrica e pode até mesmo gerar receita para os proprietários de veículos elétricos.

5.4 Desafios a serem superados: caminhos para a excelência

Apesar das promessas, a jornada rumo a um ecossistema de carregamento elétrico perfeito não é isenta de desafios. A expansão da infraestrutura para atender à crescente demanda é uma tarefa complexa que exige planejamento minucioso e investimentos substanciais. A padronização de conectores e protocolos de carregamento também é um obstáculo crucial para garantir a compatibilidade entre diferentes veículos e estações de carregamento. A gestão eficiente da carga durante os períodos de pico de demanda é um quebra-cabeça que exige coordenação precisa e algoritmos inteligentes. Além disso, a superação das limitações técnicas dos veículos elétricos, como a autonomia e a vida útil das baterias, continua a ser um foco central para a pesquisa e o desenvolvimento. É certo que, todos são desafiados a enfrentar essas complexidades com uma abordagem multidisciplinar e orientada para soluções. A conjunção de inovação tecnológica, colaboração entre indústrias e visão estratégica é fundamental para moldar um futuro em que as instalações de carregamento para carros elétricos sejam não apenas uma realidade, mas uma parte

essencial e otimizada de nossa infraestrutura global. À medida que se trilha esse caminho, o compromisso com a excelência técnica e a sustentabilidade guiará as jornadas rumo a um futuro eletrificado e resiliente [4].

6. MEDIDAS NECESSÁRIAS PARA IMPULSIONAR A ADOÇÃO E INOVAÇÃO

Neste item são detalhadas as medidas vitais necessárias para elevar ainda mais a adoção de Veículos Elétricos (VEs) e impulsionar o desenvolvimento de instalações de carregamento inovadoras. A importância de abordar esses aspectos de maneira abrangente é pelo bem do planeta, e deve ser coordenada para garantir o sucesso da transição para a mobilidade elétrica.

6.1 Colaboração estratégica: governos, setor privado e fabricantes de VEs unindo forças

Uma abordagem unificada, envolvendo governos, empresas privadas e fabricantes de VEs, é um requisito fundamental para acelerar a adoção de VEs. Políticas favoráveis, incentivos financeiros e regulamentações adequadas podem desempenhar um papel fundamental nessa jornada. Governos que têm a oportunidade devem criar ambientes regulatórios e incentivar a inovação e a adoção de VEs, oferecendo benefícios fiscais, subsídios para compra de VEs e reduções de tarifas de energia para carregamento. Colaborações público-privadas podem resultar em investimentos em infraestrutura de carregamento, tornando-a mais acessível e eficiente. Além disso, uma parceria estreita com fabricantes de VEs é crucial para garantir a interoperabilidade entre os sistemas de carregamento e os veículos.

6.2 Estímulo à pesquisa e desenvolvimento: avanços tecnológicos e eficiência energética

A pesquisa e desenvolvimento contínuos são elementos essenciais para aprimorar a tecnologia de carregamento e avançar na eficiência energética. Os pesquisadores estão cientes de que soluções inovadoras muitas vezes nascem da incessante busca por melhorias. Investir em pesquisa para desenvolver carregadores mais rápidos, eficientes e compatíveis com diferentes tipos de veículos é um passo crucial. Além disso, a otimização de sistemas de armazenamento de energia, como baterias de grande capacidade, e a exploração de novas tecnologias de armazenamento, como *supercapacitores*, poderá transformar a experiência de carregamento.

6.3 Redução de custos e escalabilidade: o caminho para a sustentabilidade

A redução dos custos de infraestrutura de carregamento é um fator crítico para tornar a mobilidade elétrica mais acessível. A colaboração entre fabricantes de equipamentos de carregamento, construtores de infraestrutura e empresas de energia pode contribuir para a padronização de componentes, reduzindo assim os custos de fabricação e implantação. Ao adotar estratégias de escalabilidade, como o desenvolvimento de estações de carregamento modulares e sistemas de gerenciamento centralizados, é possível reduzir os custos operacionais e criar uma base para a expansão futura da rede de carregamento.

6.4 Educação e conscientização: capacitando os usuários e a sociedade

Um aspecto muitas vezes subestimado é a educação e conscientização dos usuários sobre os benefícios dos VEs e as instalações de carregamento. É reconhecida a importância de tornar as pessoas informadas e confiantes em relação às novas tecnologias. Campanhas educativas e programas de conscientização podem dissipar mitos e preocupações sobre autonomia e facilitar a adoção de VEs. Além disso, a criação de uma cultura de carregamento ético, com práticas como não ocupar vagas de carregamento sem necessidade, também é crucial para otimizar o uso da infraestrutura.

Em conclusão, engenheiros e pesquisadores vislumbram um futuro eletrificado e sustentável, e reconhecem que a jornada para impulsionar a adoção de VEs e o desenvolvimento de instalações de carregamento inovadoras requer um enfoque abrangente e colaborativo. A colaboração entre governos, setor privado, fabricantes de VEs e a comunidade é o alicerce para um ecossistema de mobilidade elétrica bem-sucedido. À medida que se continua enfrentando esses desafios, é imperativo manter o compromisso com a excelência técnica, a inovação constante e o foco na sustentabilidade para moldar um futuro onde os VEs sejam a norma e as instalações de carregamento sejam a espinha dorsal da infraestrutura global.

7. SUPERANDO DESAFIOS DA MATRIZ ENERGÉTICA PARA VEÍCULOS ELÉTRICOS

Com um olhar crítico e orientado por soluções, é imperativo abordar a questão desafiadora da matriz energética insuficiente para a crescente frota de VEs - Veículos Elétricos. Entende-se que, essa é uma preocupação legítima que exige abordagens inovadoras e colaborativas para garantir a sustentabilidade de longo prazo da mobilidade elétrica.

7.1 Avaliação do cenário energético: mapeando os desafios

Antes de focar soluções, é essencial realizar uma avaliação abrangente do cenário energético atual. Com a crescente adoção de VEs, a demanda por eletricidade aumenta consideravelmente. Isso origina preocupações sobre a capacidade da rede elétrica operar sob picos de demanda fornecendo energia suficiente para carregar uma grande frota de VEs. Além disso, a dependência de fontes não renováveis para geração de eletricidade retorna discussões associadas a emissões de carbono e aos VEs.

7.2 Estratégias para mitigar a demanda energética: eficiência e gerenciamento inteligente

Uma abordagem eficaz para resolver o problema da demanda energética é otimizar a eficiência energética, da rede de carregamento e dos VEs. Desenvolver sistemas de gerenciamento de carga inteligentes é uma maneira de equilibrar a demanda, evitando picos de energia. Esta estratégia pode programar o carregamento durante períodos de baixa demanda ou a noite quando a demanda diminui e a geração de eletricidade de base hídrica bem como de parques eólicos seguem sustentáveis. A implementação de dispositivos de armazenamento de energia, como baterias de íons de lítio, pode amortecer o impacto da demanda durante os intervalos de pico.

7.3 Integração de energias renováveis: um caminho para a sustentabilidade

A expansão de fontes de energia renovável desempenha um papel crucial na solução da de problemas relacionados a insuficiência de energia. A energia solar, eólica, hidrelétrica e outras formas de geração limpa ~~podem~~ devem ser integradas ao sistema de carregamento de VEs. A instalação de painéis solares em estações de carregamento e em locais estratégicos incrementa a energia destinada aos VEs. Além disso, a tecnologia de carregamento bidirecional permite que os VEs devolvam energia à rede, contribuindo para um equilíbrio saudável entre a demanda e a oferta.

7.4 Armazenamento avançado de energia: redefinindo a resiliência

A pesquisa e desenvolvimento contínuos em tecnologias de armazenamento de energia são essenciais para superar os desafios da matriz energética. Baterias avançadas, sistemas de armazenamento de energia de fluxo e supercapacitores são dispositivos que prometem armazenar e liberar energia de maneira eficiente e flexível. Essas tecnologias podem não apenas atender a demanda dos VEs, mas também atuar como amortecedores durante os picos de consumo de energia, aliviando a pressão sobre a rede elétrica [5].

7.5 Desenvolvimento de infraestrutura inteligente: redes inteligentes de energia

As redes inteligentes de energia, ou *smart grids*, têm o potencial de transformar a forma como se gerencia e distribui a energia. A comunicação bidirecional entre veículos, estações de carregamento e a rede elétrica permite um gerenciamento mais preciso e dinâmico da demanda. Os VEs podem ser carregados automaticamente quando a energia está disponível e devolver energia à rede em momentos de necessidade. Isso não apenas otimiza o uso da energia, mas também cria uma abordagem colaborativa para gerenciar sua demanda crescente. Em última análise, a resolução do desafio da matriz energética insuficiente para VEs requer uma combinação de inovação tecnológica, colaboração entre setores e políticas governamentais sensíveis. Contudo, todos são chamados a ser agentes de mudança, projetando soluções eficazes para garantir que a mobilidade elétrica possa coexistir harmoniosamente com as necessidades energéticas. Ao abraçar abordagens multidisciplinares, impulsionadas pela pesquisa e pelo desenvolvimento contínuos, é possível contribuir para que um futuro no qual os VEs não sejam apenas uma escolha consciente, mas também uma força motriz para uma matriz energética mais sustentável.

CONCLUSÃO

Em conclusão, a transição para veículos elétricos e a expansão das instalações de carregamento são elementos intrínsecos para alcançar uma mobilidade mais sustentável e reduzir os impactos ambientais associados aos transportes. O progresso até agora, embora promissor, apresenta desafios a serem superados, desde a desigualdade na distribuição das estações de carregamento até a necessidade de aprimorar a eficiência da matriz energética. As inovações atuais e emergentes estão moldando um futuro empolgante para as instalações de carregamento, com carregadores de alta potência, integração de energias renováveis, redes inteligentes de energia e avanços na pesquisa e desenvolvimento. No entanto, a colaboração estratégica entre governos, setor privado, fabricantes de veículos elétricos e a sociedade é crucial para impulsionar a adoção e a inovação de maneira coordenada e eficaz. Ainda há um longo caminho a percorrer para criar uma infraestrutura de carregamento verdadeiramente abrangente e escalável, mas a jornada demonstra até aqui que é possível superar os desafios com estratégias bem planejadas, educação pública e investimento em tecnologias avançadas. A busca por uma mobilidade mais limpa e sustentável exige ações conjuntas e decisivas para garantir que as instalações de carregamento acompanhem o ritmo da revolução dos veículos elétricos, contribuindo para um futuro mais verde e resiliente.

AGRADECIMENTOS

É com imensa gratidão que desejo expressar meus mais sinceros agradecimentos ao meu orientador Prof. Vicente Mariano Canalli, por sua orientação, sabedoria e dedicação exemplares durante nossa jornada de aprendizado. Meus mais profundos agradecimentos por seu papel fundamental em nossa formação acadêmica e pessoal. Que a continuidade de suas contribuições inspire futuras gerações a buscar conhecimento, excelência e integridade. Sua vasta experiência e paixão pelo ensino deixaram uma marca indelével em nossos corações e mentes, inspirando-nos a abraçar os desafios acadêmicos e a buscar a excelência em cada empreendimento. Agradeço, igualmente, ao laboratorista Francisco, cujo apoio incansável e conhecimento técnico foram fundamentais para o nosso progresso e sucesso. Sua paciência, orientações e disposição para compartilhar seu conhecimento foram inestimáveis para nossa formação. Também gostaria de estender meus agradecimentos ao Professor Julio Cesar Marques de Lima, cujo comprometimento com a educação e a dedicação à pesquisa são verdadeiramente inspiradores. Sua visão ampla e perspicácia nos desafiaram a pensar além dos limites convencionais, moldando-nos como profissionais mais preparados e conscientes. Nossa jornada acadêmica não seria completa sem a orientação, o apoio e o incentivo de pessoas como vocês, que demonstraram um compromisso inabalável com a formação das próximas gerações de profissionais. Somos gratos por suas lições valiosas e pelo impacto positivo que tiveram em nossas vidas. Agradecemos a Diretoria de Pesquisa de IC - Iniciação Científica da PUCRS por incentivar os acadêmicos à pesquisa mediante o Programa de Bolsistas IC Voluntários.

REFERÊNCIAS

- [1] (RAFAEL HERRERO - 24/05/2023 – Mobilidade Estadão) - <https://mobilidade.estadao.com.br/inovacao/brasil-chega-a-3-200-eletropostos-de-recarga/#:~:text=O%20balan%C3%A7o%20da%20Associa%C3%A7%C3%A3o%20Brasileira,Pa%C3%ADs%2C%2017%20carros%20por%20carregador.>
- [2] (ADSON LEONARDO GARAGEM 360 – 17/07/2023) - <https://garagem360.com.br/bateria-rapida-recarga-carro-eletrico/>
- [3] (DIEGO FREIE – NEOCHARGE – 12/12/2022) - <https://www.neocharge.com.br/blogs/post/paises-mercado-global-carro-eletrico>
- [4] DE HOOG, J., ZIETSMAN, J., & RADWAN, E. Analyzing electric vehicle charging infrastructure performance using big data. *Journal of Cleaner Production*, 249, 119261, 2020.
- [5] HUANG, S., ZHANG, H., CHEN, G.. Review of electric vehicle charging infrastructure planning research: Problems and solutions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 421- 435.5 5, 2019.



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil

26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de

Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming

Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis

12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

CÉLULAS A COMBUSTÍVEL E VEÍCULOS ELÉTRICOS

Lucas Melo Machado - Autor ⁽¹⁾

Jorge Pimentel de Moraes - Autor ⁽²⁾

Matheus Chidiac Marchiori ⁽¹⁾

Marçal Rodrigues Pires - Orientador ⁽³⁾

Vicente Mariano Canalli - Orientador ⁽³⁾

RESUMO

Este artigo revisa o uso de células a combustível de hidrogênio como uma solução promissora para a alimentação de veículos elétricos. São descritos os princípios de funcionamento das células a combustível a hidrogênio, suas vantagens em relação às baterias convencionais e os desafios enfrentados pela tecnologia e as perspectivas futuras. Além disso, é abordada a infraestrutura de abastecimento de hidrogênio e seu papel fundamental na adoção em larga escala de veículos elétricos movidos a hidrogênio. Com base na análise realizada, é possível concluir que as células a combustível a hidrogênio têm o potencial de fornecer uma solução sustentável e eficiente para a mobilidade elétrica. Uma iniciativa voltada a implementação de um protótipo didático desta arquitetura veicular está sendo desenvolvida na PUCRS.

Palavras Chave: Célula a combustível, hidrogênio, veículos elétricos movidos a hidrogênio, baterias convencionais, protótipo didático

⁽¹⁾ Electrical Engineer, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil

⁽²⁾ Mechanical Engineer, Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil

⁽³⁾ Prof. Dr. Eng., Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Brazil.

FUEL CELLS AND ELECTRIC VEHICLES

Lucas Melo Machado - Author ⁽¹⁾
Jorge Pimentel de Moraes - Author ⁽²⁾
Matheus Chidiac Marchiori ⁽¹⁾
Marçal Rodrigues Pires - Adviser ⁽³⁾
Vicente Mariano Canalli - Adviser ⁽³⁾

ABSTRACT

This article review the use of hydrogen fuel cells as a promising solution for powering electric vehicles. The working principles of hydrogen fuel cells, their advantages over conventional batteries and the challenges faced by the technology and prospects are described. In addition, the hydrogen fueling infrastructure and its key role in the large-scale adoption of hydrogen-powered electric vehicles are addressed. Based on the analysis carried out, it is possible to conclude that hydrogen fuel cells have the potential to provide a sustainable and efficient solution for electric mobility. An initiative aimed at implementing a didactic prototype of this vehicular architecture is being developed at PUCRS.

Keywords: Fuel cell, hydrogen, electric vehicles powered by hydrogen, conventional batteries, didactic prototype

1. INTRODUÇÃO

A transição para a mobilidade elétrica tem se destacado como uma das soluções mais promissoras na mitigação das crescentes preocupações relacionadas às emissões de gases de efeito estufa e à dependência contínua de combustíveis fósseis no setor de transporte. As baterias de íon-lítio têm sido a escolha predominante para alimentar veículos elétricos, mas as células a combustível a hidrogênio estão emergindo como uma alternativa igualmente convincente e inovadora.

O hidrogênio, como fonte de energia limpa, não apenas contribui para a preservação do meio ambiente, mas também oferece benefícios notáveis, como a capacidade de transporte em longas distâncias e o armazenamento em grande escala. Essas características possibilitam o eficiente armazenamento de energia renovável, endereçando assim o desafio do desperdício de recursos energéticos [1]. Diante disso, a energia do hidrogênio está ganhando reconhecimento como um componente essencial do futuro sistema energético.

Uma análise realizada através do site “*Science Direct*”, que examinou os artigos publicados na área de Energias Renováveis em 2022, revelou que a energia do hidrogênio despontou como o tema mais proeminente, representando 35% dos artigos publicados. Isso a posicionou como o tópico dominante, à frente de questões relacionadas ao aproveitamento de resíduos para geração de energia solar, eólica, hidráulica e bioenergia. A pesquisa nessa área abrange uma parcela significativa dos estudos, concentrando-se na análise dos recursos, benefícios, metodologias e aplicabilidade da energia do hidrogênio [2].

Este artigo visa explorar o potencial das células a combustível de hidrogênio como uma solução sustentável para a mobilidade elétrica. Dada a crescente urgência das questões ambientais e da crise energética global, a busca por fontes de energia limpa se tornou uma prioridade incontornável para o avanço sustentável da humanidade. Vários países e empresas têm alocado consideráveis recursos para pesquisa e desenvolvimento de novas fontes de energia alternativas e renováveis. Nesse

cenário, o hidrogênio se destaca como uma alternativa verde e limpa altamente promissora para o futuro, graças à sua baixa pegada ambiental e notável eficiência [3].

Outro aspecto destacado neste artigo é o fascínio dos engenheiros pelos protótipos, pois estes traduzem o conhecimento teórico em aplicações físicas tangíveis ou engenhosas criações práticas. Tradicionalmente a Engenharia Elétrica e de Controle e Automação são um ramo difícil, cheio de desafios e com muita matemática. Por isso é de suma importância que se consiga fazer com que aluno se sinta feliz e que se incentive as suas iniciativas práticas. O Engenheiro se sente valorizado quando transforma a matemática em aplicações que possam contribuir com a sociedade. Até mesmo quem não gosta de matemática se sentiria. Além disso, este mercado latente tenderá a se potencializar em um futuro próximo gerando empregos e abrindo um espaço para os egressos de nosso curso. É de conhecimento o leque de segmentos terceirizados que podem ser gerados a partir da evolução deste tema e a importância do incentivo deste estudo. Ainda em 2003 A PUCRS iniciou pesquisas pioneiras envolvendo o hidrogênio com a aprovação e execução de Projeto de Pesquisa realizado com apoio da ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica e a antiga CEEE – Companhia Estadual de Energia Elétrica intitulado ESTUDO E APLICAÇÃO DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL NA GERAÇÃO DE ENERGIA.

Este projeto trouxe na ocasião muitas oportunidades de estudo e pesquisa. Além de inúmeros módulos didáticos foram adquiridas duas unidades geradoras de energia de 1kW que utilizam células de combustível a hidrogênio. Foi elaborada e implementada com o auxílio de especialistas uma infraestrutura experimental pioneira com vistas a operação segura com o hidrogênio, denominada de LENAG – Laboratório de Energia e Aplicação de Gases.

A infraestrutura de laboratório implementada foi anexada ao LCEE – Laboratório de Conversão de Energia foi desativada há alguns anos. Na ocasião enfrentou-se inúmeros entraves para seguir esta pesquisa, seja pela extinção de cursos da universidade ou pelo gargalo primordial que é a utilização segura do hidrogênio. Na estrutura do LENAG além de módulos comerciais, se dispõe de inúmeros módulos didáticos, incluindo um veículo miniatura equipado com uma célula a combustível reversível a membrana com um eletrolisador embarcado, apresentado na figura 1.



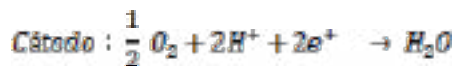
Figure 1: Módulo didático comercial H-TEC com uma célula a combustível reversível e eletrolisador [4].

No início deste semestre foi aprovado pela PUCRS, o projeto intitulado: TESTE E ESTUDO DE SEGURANÇA DE MÓDULOS CÉLULA A COMBUSTÍVEL APLICÁVEIS A PROTÓTIPO DE VEÍCULO ELÉTRICO – FCEV – *FUEL CELL ELECTRIC VEHICLE*. O projeto faz parte do Programa de Bolsas Pesquisa Alunos da PUCRS BPA - CHAMADA GERAL EXTRAORDINÁRIA - 2023 que foi desenvolvido com o apoio um bolsista de IC-Iniciação Científica com a duração de seis meses. Neste projeto foi reunida a contribuição de bolsistas de IC voluntários, professores pesquisadores, e de participantes do Programa PEGA – Programa de Extensão e Gestão das Atividades de Formação Continuada, que se encontra aberto ao público em geral. Em conjunto com estas iniciativas está o PROJETO GUARDA-CHUVA NA LINHA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS: PROTÓTIPOS, ADAPTAÇÃO, LOGÍSTICA E INFRA-ESTRUTURA DE TESTES. Através deste projeto foi possível ofertar via EDUCON – Educação Continuada PUCRS, um Curso de Certificação de Veículos Elétricos a Bateria que congregou inúmeros entusiastas e interessados na área.

2. OPERAÇÃO DAS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL A HIDROGÊNIO E REFORMADORES

Uma célula a combustível é um dispositivo que realiza a conversão de energia química em energia elétrica por meio de um processo eletroquímico, utilizando o hidrogênio como seu principal combustível. Este método oferece uma série de vantagens notáveis, incluindo um desempenho limpo, alta eficiência e baixo nível de emissões sonoras. Portanto, as células a combustível se destacam

como uma das principais abordagens para aproveitar o potencial energético do hidrogênio [1]. Uma célula a combustível tem a capacidade de efetuar uma conversão direta da energia química armazenada no combustível, como o hidrogênio, em eletricidade, sem necessitar de etapas intermediárias de conversão. Esse processo é uma forma controlada de combustão eletroquímica que ocorre entre o oxigênio e o hidrogênio, resultando na geração simultânea de eletricidade, água e calor, assemelhando-se a uma espécie de eletrólise reversa [5]. São apresentadas as reações químicas que ocorrem na célula de combustível:



onde Q1 é energia elétrica e Q2 é energia térmica [1].

3. CÉLULAS DE COMBUSTÍVEIS DE HIDROGENIO E BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO

As células de combustível de hidrogênio apresentam diversas vantagens significativas em relação às baterias de íon-lítio. As baterias de íon-lítio desempenham um papel essencial como tecnologia de armazenamento primário de energia em veículos, sistemas de energia renovável e na integração com a rede elétrica. Elas realizam a conversão da eletricidade em energia química e, ao longo do tempo, têm surgido diversas tecnologias de baterias visando aprimorar sua aplicabilidade em diversas áreas [6]. No entanto, as baterias de íon-lítio operam em uma faixa de temperaturas restrita, geralmente entre 20°C e 60°C. Temperaturas abaixo de 20°C resultam em uma redução na capacidade de energia das baterias, enquanto temperaturas acima de 60°C causam o envelhecimento prematuro das células devido ao calor, transformando o eletrólito líquido em gás [7]. Em contrapartida, as células de combustível possuem uma faixa de temperatura operacional mais ampla, um tempo de inicialização mais curto e uma maior densidade de potência. No entanto, elas requerem sistemas de resfriamento para dissipar o calor gerado durante a produção de energia [6].

A Tabela 1 apresenta uma comparação entre as células de combustível e as baterias de íon-lítio no contexto de veículos elétricos.

Tabela 1: Vantagens e Desvantagens entre Células de Combustíveis de Hidrogênio e Baterias de Íons de Lítio.

Tipo de Combustível do Veículo	Vantagens	Desvantagens
Bateria de Íons de Lítio	Potente e eficiente em energia	Demanda por metais raros
	Despesas de manutenção reduzidas	Recarga demorada
	Sem emissões no escapamento	Falta de instalações de recarga públicas
	Condução suave e silenciosa	Não adequado para viagens de longa distância
Célula de Combustível de Hidrogênio	Fonte de energia renovável e prontamente disponível	Custo mais elevado de matérias-primas
	Altamente eficiente	Processo de extração de hidrogênio
	Sem emissões no escapamento	Falta de infraestrutura para abastecimento de hidrogênio
	Tempo de abastecimento reduzido	Altamente inflamável

Uma distinção fundamental entre baterias e células de combustível de hidrogênio está relacionada à maneira como obtêm energia. As células de combustível geram energia a partir de um combustível facilmente disponível, enquanto as baterias armazenam energia para uso posterior. Em veículos elétricos que utilizam baterias, uma variedade de substâncias químicas, como níquel-cádmio, chumbo-ácido selado, hidreto metálico de níquel e íons de lítio, é empregada para armazenar essa energia. Por outro lado, nos veículos equipados com células de combustível de hidrogênio, a energia necessária é produzida por meio de uma reação química entre o hidrogênio e o oxigênio [8].

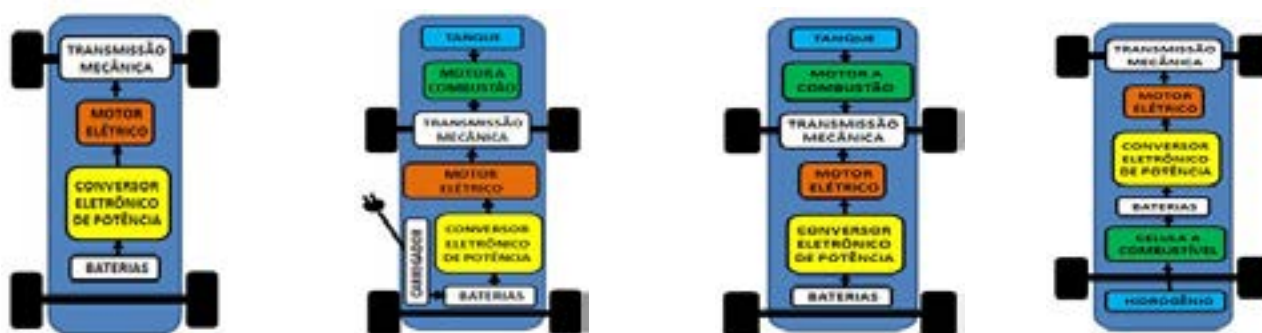
Apesar do potencial promissor, as células a combustível de hidrogênio enfrentam desafios significativos que incluem a necessidade de produzir e armazenar hidrogênio de forma eficiente, garantir a durabilidade das células e superar a infraestrutura limitada de abastecimento de hidrogênio. A resolução destas questões é crucial para possibilitar uma adoção generalizada desta tecnologia.

Um dos desafios notáveis na implementação das células de combustível de hidrogênio como fonte de energia para veículos elétricos reside na sua produção de tensão relativamente baixa durante o processo, normalmente variando entre 0,4 V e 1,0 V. Para atender às demandas de potência requeridas em aplicações veiculares, é prática comum conectar centenas de células individuais em série. Isso permite gerar a quantidade necessária de energia elétrica para atender a esses requisitos [5]. Vale destacar que as características de volt-ampere de uma célula a combustível não são lineares, resultando em uma tensão de saída baixa e variável. Portanto, é fundamental utilizar um conversor eletrônico de potência com especificações correspondentes para regular o fluxo de energia, uma vez que a célula a combustível não pode ser diretamente conectada à carga. O conversor eletrônico de potência desempenha um papel crucial, servindo como uma interface vital entre a célula a combustível e a carga, e é um componente essencial no sistema de geração de energia por meio de células a combustível [1].

Outro desafio na pesquisa relacionada às células de combustível está na identificação de materiais adequados para operar em temperaturas mais elevadas e com baixa umidade relativa. Essa busca visa simplificar o design do sistema, melhorar a dissipação de calor e reduzir as perdas de energia causadas pelo compressor de ar [9].

4. PRINCIPAIS ARQUITETURAS DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS INCLUINDO OS FCEV

A figura 2 ilustra as principais arquiteturas dos veículos elétricos.



(a) Elétrico a Bateria

(b) Híbrido conectado a tomada

(c) Híbrido

(d) Célula a combustível

Figure 3: Principais arquiteturas dos veículos elétricos

Veículos de passeio que utilizam células a combustível em inglês, FCEV – *Fuel Cell Electric Vehicles* ainda não estão disponíveis no Brasil, limitando-se, por enquanto, aos mercados alemão, japonês e americano. As células a combustível, utilizam o hidrogênio armazenado em um cilindro e o oxigênio captado da atmosfera para produzir a eletricidade que alimenta o motor elétrico que movimenta o veículo. Veículos que utilizam as células a combustível, além de não emitir gases poluentes, operam em silêncio da mesma forma que um carro elétrico convencional, proporcionando uma maior autonomia. Nos modelos de automóveis movidos a célula de combustível comercializados hoje, o sistema funciona basicamente como um gerador de eletricidade alimentado por hidrogênio, abastecido como um carro convencional, em estações específicas, sendo que a bateria utilizada é menor.

5. CÉLULAS A COMBUSTÍVEL E A ALTERNATIVA E INFRAESTRUTURA DO ETANOL

As tecnologias que utilizam o etanol empregam atualmente um reformador ou células diretas

5.1. Células a combustível que utilizam um reformador

O Toyota Mirai é o primeiro veículo de série, à Célula de Combustível- FCEV - *Fuel Cell Vehicle*. Não se trata de um veículo adaptado. Sua concepção envolveu a criação de uma plataforma específica para utilizar este conceito. Apesar de ser um veículo de porte grande, pesando quase 2.000 kg, entrou para o *Guinness World Records*, o Livro dos Recordes, ao percorrer uma distância de 1.359,9 quilômetros com um único tanque de hidrogênio. A estrutura é suficiente para acomodar uma bateria elétrica de 1,2 kW e 330 células de hidrogênio, responsáveis por gerar energia para o motor elétrico de 184 cavalos e 30,6 kgfm de torque [10].

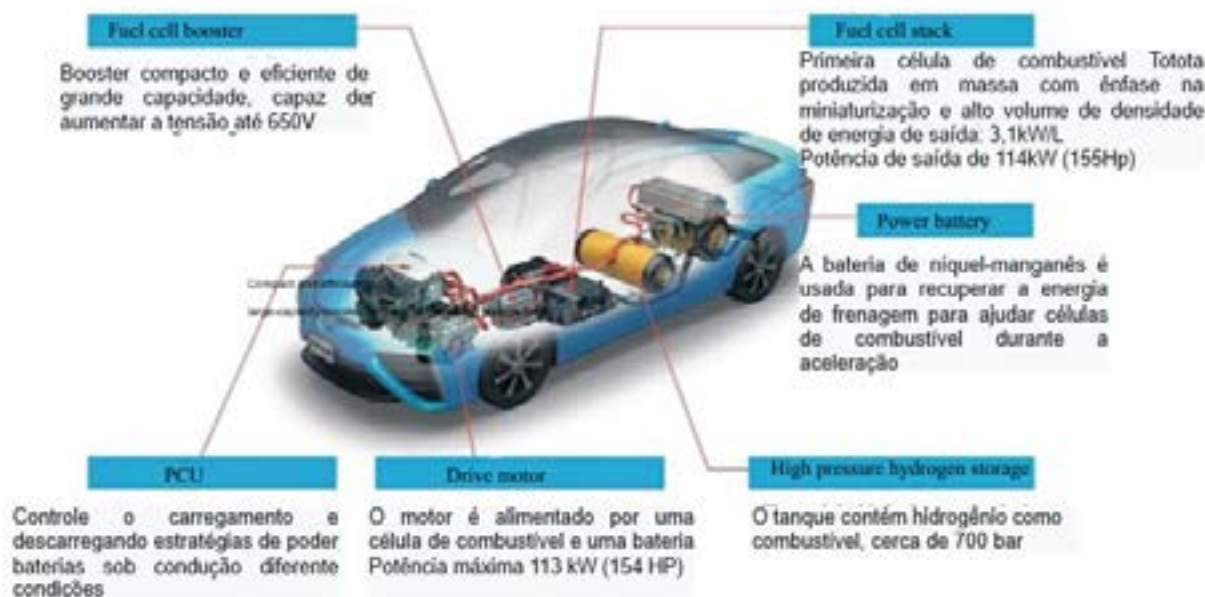


Figure 3: Toyota Mirai Adaptado de [11].

Seu projeto já está na segunda geração, e um exemplar deste patamar tecnológico acaba de chegar ao Brasil, para servir de laboratório com o etanol brasileiro, e assim, criando o termo hidrogênio verde e amarelo, sendo considerado um dos veículos mais limpos do mundo. O projeto terá custo de R\$ 50 milhões e será financiado pela Shell Brasil e Raízen. As pesquisas serão tocadas pela Universidade de São Paulo (USP), pelo Centro de Pesquisa para Inovação em Gases de Efeito Estufa (RCGI) e pelo Senai CETIQT. Neste caso o etanol passa por um processo de reforma

5.2. Células a combustível diretas

O primeiro teste utilizando células a combustível diretas a etanol, ocorreu na *Hochschule Offenburg University of Applied Sciences* em 2007 conforme ilustra a figura 4. Neste caso o etanol é fornecido de forma direta à célula de combustível.



Figure 4: Protótipo do primeiro teste com uma célula direta a etanol [12].

6. ARQUITETURA TÍPICA VEÍCULO ELÉTRICO COM CÉLULA A COMBUSTÍVEL

Este projeto propõe a implementação de um protótipo de um *quadriciclo elétrico* ou FCEV – *Fuel Cell Electric Vehicle*, utilizando uma arquitetura similar a ilustrada na figura 5.

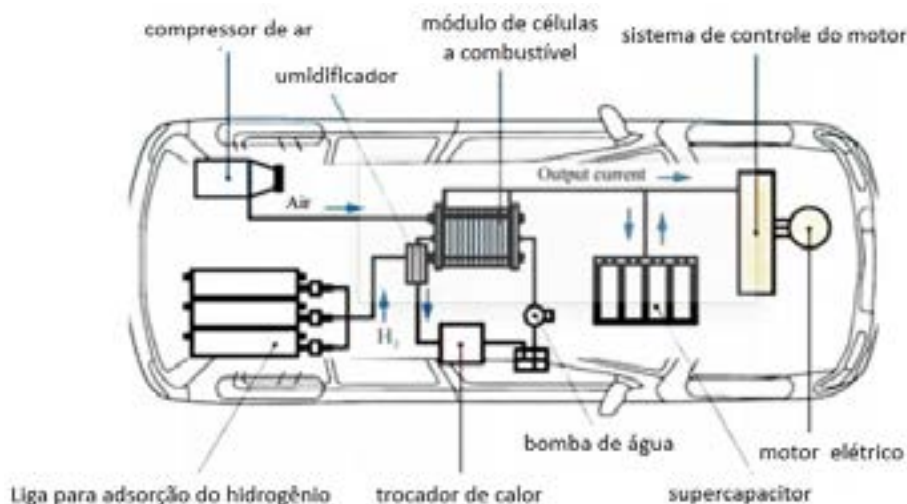


Figure 5: Sistema de potência típico de um veículo elétrico com célula a combustível [11].

O veículo será implementado usando uma célula a combustível de 1kW e um motor de 1CV disponíveis no LENAG e no LCEE – Laboratório de Conversão Eletromecânica de Energia.

O protótipo implementado terá uma finalidade puramente didática, e será utilizado nos Cursos de Certificação de Veículos Elétricos a Bateria e no futuro Curso de Certificação na Área de Segurança do Hidrogênio, não sendo colocado efetivamente em operação, tendo-se em vista o atual gargalo de segurança do hidrogênio.

Os principais objetivos deste projeto são:

- a) promover valores do ideário Marista na universidade
 - a) contribuir para a formação e inserção de estudantes em atividades de pesquisa
 - b) contribuir para desenvolvimento tecnológico e inovação
 - c) contribuir para a formação de recursos humanos com capacidade inovadora em empresas no País
 - d) contribuir para a formação do cidadão pleno voltado aos interesses da comunidade e meio-ambiente
 - e) fomentar o empreendedorismo
 - f) valorizar a experimentação nos Cursos de Engenharia
 - g) promover a utilização e a valorização da invejável infraestrutura de laboratórios da PUCRS.
 - h) revitalizar a estrutura do LENAG para aplicação didática
 - i) agregar valor de forma segura, aos equipamentos disponíveis no LENAG
 - j) pesquisar um tema importante, na área de sustentabilidade e meio ambiente.
 - k) pesquisar um tema atual e que perspectivas de apoio por meio de editais de fomento.
 - l) pesquisar um tema que curiosamente despertou grande interesse da comunidade acadêmica.
 - m) definir os componentes do LENAG, necessários a implementação do veículo.
 - n) adaptar uma célula a combustível em um protótipo de *quadriciclo* elétrico.
 - o) apoiar as novas edições do Curso de Certificação em Veículos Elétricos a Bateria.
 - p) apoiar na elaboração de Curso de Certificação Específico na Área de Segurança do Hidrogênio.

CONCLUSÃO

A transição para a mobilidade elétrica representa uma resposta essencial às crescentes preocupações ambientais e à necessidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis no setor de transporte. Embora as baterias de íon-lítio tenham desempenhado um papel significativo nesse cenário, as células a combustível de hidrogênio emergem como uma alternativa igualmente promissora e inovadora. O hidrogênio como fonte de energia limpa oferece benefícios notáveis, como a capacidade de armazenamento em larga escala e transporte eficiente em longas distâncias, além de contribuir para a preservação do meio ambiente. A pesquisa e o desenvolvimento na área de energia do hidrogênio têm ganhado destaque, refletindo a crescente importância dessa fonte

energética no cenário global. Este artigo explorou o potencial das células a combustível de hidrogênio como uma solução sustentável para a mobilidade elétrica. A análise revelou que essas células têm a capacidade de converter energia química em eletricidade de maneira limpa e eficiente, apresentando vantagens em relação às baterias convencionais, como uma faixa de temperatura operacional mais ampla e maior densidade de potência. No entanto, desafios significativos precisam ser superados para viabilizar a adoção em larga escala das células a combustível de hidrogênio, incluindo a produção e o armazenamento eficientes de hidrogênio, a durabilidade das células e a expansão da infraestrutura de abastecimento de hidrogênio. É importante ressaltar que o avanço nessa tecnologia não apenas impactará positivamente a mobilidade elétrica, mas também terá implicações mais amplas na sociedade, como a formação de recursos humanos capacitados e a promoção de valores relacionados à sustentabilidade e ao meio ambiente. Nesse contexto, o projeto de implementação de um protótipo de veículo elétrico com célula a combustível de hidrogênio na PUCRS representa um passo significativo na direção da pesquisa e desenvolvimento dessa tecnologia. Combinando esforços de alunos, professores e especialistas, essa iniciativa não apenas contribuirá para a formação acadêmica, mas também para o avanço tecnológico e a inovação na área de mobilidade elétrica e energia do hidrogênio.

Em resumo, as células a combustível de hidrogênio têm o potencial de desempenhar um papel vital no futuro da mobilidade elétrica, fornecendo uma solução limpa e eficiente. A pesquisa e os projetos em andamento, como o protótipo desenvolvido na PUCRS, demonstram o compromisso em direção a um futuro mais sustentável e inovador.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Diretoria de Pesquisa de Iniciação Científica, a PUCRS e ao CNPq – Conselho Nacional de Pesquisa por viabilizar as pesquisas por meio da formação de um grupo de pesquisa por apoiar o grupo com bolsas de Iniciação Científica que tem concedido a nossos alunos. Aos organizadores do Renomat, gratidão pela lembrança, paciência e por oportunizar a participação do Grupo de Energia de Aplicação do CNPq

REFERÊNCIAS

- [1] JINGHUA Z., ZHANG Q, Li J. "Topology and Control of Fuel Cell Generation Converters" *Energies* 16, no. 11: 4525. <https://doi.org/10.3390/en16114525>, 2023
- [2] GUCHHAIT R.; SARKAR B. Increasing Growth of Renewable Energy: A State of Art. *Energies* 2023, 16, 2665. <https://doi.org/10.3390/en16062665>
- [3] FU J.; ZENG L.; LEI J.; DENG Z.; FU, X.; LI, X.; WANG Y. A Real-Time Load Prediction Control for Fuel Cell Hybrid Vehicle. *Energies* 2022, 15, 3700. <https://doi.org/10.3390/en15103700>
- [4] H-TEC – Experiments with Hyrunner e-pack reversible fuel cell
- [5] GAO F., "Hydrogen fuel cell electric vehicles: State of Art and outlooks," 2022 IEEE 9th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA), Hong Kong, Hong Kong, 2022, pp. 1-2. doi:10.1109/PESA 55501.2022.10 038 378
- [6] AKIMOTO Y., TAKEZAWA H., IJIMA Y., SUZUKI S., OKAJIMA K. Comparative analysis of fuel cell and battery energy systems for Internet of Things devices, *Energy Reports*, Volume 6, Supplement 6. 2020. Pages 29-35. ISSN 2352-4847 <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.08.022>
- [7] ZHANG G., XUEZHE W., SIQI C., GANG W., JIANGONG Z., XUEYUAN W., GUANGUSHUAI H, HAIFENG D. Research on the impact of high-temperature aging on the thermal safety of lithium-ion batteries. *Journal of Energy Chemistry*, 2023. ISSN 2095-4956, <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.08.040>
- [8] ENDIZ M. A Comparison of Battery and Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles for Clean Transportation. *Orclever Proceedings of Research and Development*. 2. 10-17. 10.56038/oprd.v2i1.230., 2023
- [9] GRÖGER O. et al J. Review—Electromobility: Batteries or Fuel Cells? *Journal of The Electrochemical Society*, Volume 162, Number 14 *Electrochem. Soc.* 162 A2605 DOI 10.1149/2.0211514jes, 2015
- [10] SITE CANALTECH.COM (2023) <https://canaltech.com.br/carros/andamos-no-mirai-carro-movido-a-hidrogenio-da-toyota-229877/>
- [11] CHEN Y. - New Energy Vehicle Powertrain Technologies and Application Technologies, 2021
- [12] SITE SCHLUCKSPRECHT (2007) <http://www.schluckspecht.net/Eng/Technics>, em 11/10/2007



42° SENAFOR



CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE INOVAÇÃO EM MATERIAIS E MANUFATURA
INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATION IN MATERIALS AND MANUFACTURING

PALESTRAS E TRABALHOS TÉCNICOS LECTURES & TECHNICAL PAPERS

INOVMAT 1

Wire Arc Additive Manufacturing, tool path determination and manufacturing shape management challenges.

Frédéric VIGNAT (University Grenoble Alpes)

INOVMAT 2

Metal Injection Molding: Production of high complexity and high volume metal parts

Sven Fleischmann (Business Development – Metal Systems, BASF SE Alemanha)

INOVMAT 3

Additive Manufacturing: Metal FFF 3D Printing

Tobias Rödlmeier (Business Development Manager of Metal Ecosystem - BASF 3D Printing Solutions, Alemanha)

INOVMAT 4

Manutenção inteligente: do Passado ao Futuro

Intelligent Maintenance: From Past to Future

Renato Ventura Bayan Henriques (UFRGS)

INOVMAT 5

Endireitamento por Rolos Cruzados: Fundamentos e Desenvolvimentos

Cross Roll Straightening: Fundamentals and Developments

Renan Silvano Krapf, André Rosiak e Lirio Schaeffer (CBCM UFRGS)

INOVMAT 6

Rastreabilidade digital de lingotes e tarugos em fornos de aquecimento para forjamento de produtos não seriados

Digital traceability of ingots and billets in non-series production heating furnaces.

Joel Renato da Silva (Villares Metals)

INOVMAT 7

Dimensionamento de extrusora laboratorial para confecção de filamento compósito PLA-Grafeno

Laboratory extruder sizing for manufacturing PLA-Graphene composite filament.

Adrian Luiz Cinelli, Fabricio Zimmermann, Vitor Sartori Tempestini e Alex Fabiano Bueno (UFSC – Campus Blumenau)

INOVMAT 8

Análise da substituição de um parafuso com adesivo microencapsulado através da implementação de um parafuso com coeficiente de atrito controlado e da estratégia de aperto por torque e ângulo de deslocamento

Analysis of the replacement of microencapsulated adhesive bolts through the implementation of bolts with controlled friction coefficient and tightening strategy using torque and angle displacement.

Wagner Pereira, Jorge Luis Braz Medeiros (FURG); Roberto Garcia (Metaltork)

INOVMAT 9

Influência da temperatura de conformação na resistência à corrosão de ligas de Magnésio com terras raras – Uma revisão

Guilherme Vilmar Herter Carlan, Eduardo Luis Schneider, Lisete Cristine Scienza, Jakson Manfredini Vassoler (UFRGS); Diego Tolotti de Almeida (BRUNING Tecnometal)



42° SENAFOR



CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE INOVAÇÃO EM MATERIAIS E MANUFATURA
INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATION IN MATERIALS AND MANUFACTURING

INOVMAT 10

Desenvolvimento de Materiais e Processos para Manufatura Aditiva para a Indústria 4.0

Vinicius Martins (E.F.A. Project do IFSul - Campus Sapucaia do Sul)

INOVMAT 11

Avaliação do Processo Híbrido de Manufatura Aditiva de Aços Por Fusão Localizada e Forjamento Subsequente

Evaluation of the Hybrid Process of Additive Manufacturing of Steels by Localized Melting and Subsequent Forging

Carlos Antônio Ferreira, Anderson Daleffe, Jovani Castelan, Daniel Fritzen, Natan Damian Crozetta (UNISATC); Lirio Schaeffer (UFRGS)

INOVMAT 12

Desenvolvimento do processo de manufatura aditiva com deposição localizada através da tecnologia GMAW duplo arame

Development of the additive manufacturing process with localized deposition using TANDEM GMAW welding technology.

Denis Kohler Dagostim, Aline Cipriano, Gilson de March, Daniel Fritzen, Anderson Daleffe (Centro Universitário SATC – UNISATC)

INOVMAT 13

Estudo do processo de manufatura aditiva de aços de médio carbono por fusão localizada

Study of the additive manufacturing process of medium carbon steels by localized melting

Pedro Henrique Menegaro Possamai, Jovani Castelan, Lirio Schaeffer, Carlos Antônio Ferreira, Natan Damian Crozetta, Anderson Daleffe (SATC)

INOVMAT 14

Uma cadeia numérica para a gestão de dados materiais e projeto sustentável de produtos

A numerical chain for material data management and sustainable product design

Mauricio Dwek (ANSYS – Pensilvânia, EUA)

INOVMAT 15

Tendências na propriedade intelectual

Trends in intellectual property

Roberto Marques Strohaecker (INPI)

INOVMAT 16

Avaliação da integridade de superfície e das propriedades mecânicas para L-PBF do aço 316L para a fabricação de ferramentas automotivas

Surface Integrity and Mechanical Properties Evaluation of L-PBF 316L Steel for Automotive Tools Manufacturing

Matheus Rubik; Ronnie Rego, Bruno Lima, Izabel Lima e Victor Chastinet (ITA)

INOVMAT 17

Utilização de manufatura aditiva com soldagem robotizada aplicada em recuperação de ferramentas de mineração

Use of additive manufacturing with robotic welding applied in recovery of mining tools

Rodrigo Concer, Anderson Daleffe, Daniel Fritzen, Gilson De March (UNISATC)



42º SENAFOR



CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE INOVAÇÃO EM MATERIAIS E MANUFATURA
INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATION IN MATERIALS AND MANUFACTURING

INOVMAT 18

Estudo da Eficiência Mecânica de Uma Engrenagem Bimetálica Cilíndrica de Dentes Retos Obtidos por Manufatura Aditiva de Fusão Localizada Aplicadas à Transmissões Automotivas

Study of the Mechanical Efficiency of a Cylindrical Bimetallic Gear with Straight Teeth Obtained by Additive Manufacturing of Localized Fusion Applied to Automotive Transmissions

Joélson Vieira da Silva, Carlos Antônio Ferreira, Anderson Daleffe, Jovani Castelan, Daniel Fritzen (UNISATC); Lírio Shaeffer (UFRGS)

INOVMAT 19

Uso da manufatura aditiva por fusão localizada na recuperação de estampo para indústria cerâmica

Use of additive manufacturing by localized melting in stamp recovery for the ceramic industry

Ramon José, Daniel Fritzen, Anderson Daleffe (SATC); Lírio Schaeffer (UFRGS)

TRABALHO EM PÔSTER

Exposição dos painéis nos dias 4, 5 e 6 de outubro

INOVMAT POSTER 1

Preparação de híbridos de serragem de madeira com 3-aminopropiltriethoxissilano. Aplicação como adsorvente para remoção do corante reativo azul 4 de efluentes aquosos.

Preparation of hybrids of wood sawdust with 3-aminopropyltriethoxysilane. Application as an adsorbent to remove reactive blue 4 dye from wastewater effluents.

Beatris Lisbôa Mello, Éder Cláudio Lima, Roberta Arlêu Teixeira; Pâmela Vianini da Silva; Paula da Cruz; Amanda Elisa Giovanaz; Julio César Pacheco Vaghetti (UFRGS); Pascal Silas Thue (UFPEL); Fernando Marchioro Kasperiski (Universidade Federal de Ciências da Saúde de Porto Alegre); Flávio André Pavan (UNIPAMPA, Campus Bagé)

INOVMAT POSTER 2

Análise da incorporação do pó de carnaúba sobre a permeabilidade de um geopolímero

Analysis of the Incorporation of Carnauba Powder on the Permeability of a Geopolymer

Saulo Roca Bragança, Pedro Ivo Rocha Santos, Adalberto Viana Rodrigues (UFRGS)

INOVMAT POSTER 3

Composto de metil polissiloxano e biocarvão de abacate como adsorvente para remoção de ciprofloxacina de efluentes aquosos

Composite of methyl polysiloxane and avocado biochar as adsorbent for removal of ciprofloxacin from Waters

Paula da Cruz, Éder Cláudio Lima, Beatris Lisbôa Mello, Roberta Arleu Teixeira, Pamela Vianini da Silva, Amanda Elisa Giovanaz, Julio Cesar Pacheco Vaghetti (UFRGS); Pascal Silas Thue (UFPEL); Fernando Marchioro Kasperiski (UFCSPA); Flávio André Pavan (UNIPAMPA - Campus de Bagé)

INOVMAT POSTER 4

Diferentes processos de tratamento térmico para o aço sae 4150 visando a substituição do processo de austêmpera: efeito sobre as propriedades mecânicas e metalúrgicas

Different heat treatment processes for sae 4150 steel aiming to replace the austempering process: effect on mechanical and metallurgical properties

(Michele Cipolatto da Rosa (UFRGS; MBA gestão de projetos FADERGS), Maria Gabriela de Souza Zeferino (UFRGS), Bruno Jardel Budke (UNISINOS), Augusto Reichelt Maders (UFRGS), Jonatha Skieres de Lima (UFRGS), Bruno Rodrigues da Silva (CNEC/RS) e Célia de Fraga Malfatti (UFRGS)



42° SENAFOR



CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE INOVAÇÃO EM MATERIAIS E MANUFATURA
INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATION IN MATERIALS AND MANUFACTURING

INOVMAT POSTER 5

Investigação do Processo de Manufatura Aditiva com Fusão de Ligas Especiais através do Processo TANDEM

Investigation of the additive manufacturing process with melting of special alloys through the tandem process

Aline Cipriano, Anderson Daleffe, Jovani Castelan, Denis Kohler Dagostim (UNISATC); Célia de Fraga Malfatti (UFRGS)

INOVMAT POSTER 6

Fabricação de Peças Metálicas por Manufatura Aditiva com Diferentes Características Mecânicas Superficiais

Manufacturing process of metallic parts by additive manufacturing using the Tandem method in the joining of two metallic alloys.

Henrique Cechinel Casagrande, Anderson Daleffe, Gilson de March, Daniel Fritzen (UNISATC); Lirio Schaeffer (UFRGS)

INOVMAT POSTER 7

Uso de biochar preparado a partir do caroço do açaí como adsorvente para a adsorção de catecol de efluentes sintéticos

Use of biochar prepared from the açaí seed as adsorbent for the uptake of catechol from synthetic effluents

Pâmela Vianini da Silva, Pâmela Vianini da Silva, Éder Cláudio Lima, Pascal Silas Thue, Beatris Lisbôa Mello, Roberta Arleu Teixeira, Paula da Cruz, Amanda Elisa Giovanaz, Julio Cesar Pacheco Vaghetti (UFRGS); Fernando Marchioro Kasperiski (UFCSPA); Flávio André Pavan (UNIPAMPA - Campus de Bagé)

INOVMAT POSTER 8

Desenvolvimento de Dispositivo para Avaliar Biolubrificantes com Ênfase na Precisão da Medição do Coeficiente de Atrito.

Development of a Device to Evaluate Biolubricants with Emphasis on Friction Coefficient Measurement Accuracy

Germano Lasch (PROMEC, UFRGS); Régis H. da S. Souza, Yago M. Dias, Arthur M. Alles, Gabriel G. Leturiondo, Luiza O. Coelho (DEMEC, UFRGS); Gustavo S. Gehlen, Jean C. Poletto (UFRGS); Liu Y. de Barros, Ney F. Ferreira e Patric D. Neis (Laboratório de Tribologia, UFRGS)



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil
26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

ENDIREITAMENTO POR ROLOS CRUZADOS: FUNDAMENTOS E DESENVOLVIMENTOS

Renan Silvano Krapf ⁽¹⁾

André Rosiak ⁽²⁾

Lirio Schaeffer ⁽³⁾

RESUMO

O endireitamento com rolos cruzados desempenha um papel fundamental na produção de ligas metálicas. Na indústria siderúrgica, sua aplicação visa corrigir distorções em barras após o processo de trabalho a quente. Apesar de sua importância crítica, é notável a escassez de informações sobre esse tópico na literatura existente. Portanto, este trabalho oferece uma análise abrangente do processo de endireitamento de produtos siderúrgicos usando rolos cruzados, explorando seus princípios fundamentais, parâmetros relevantes e simulações numéricas. Tal conhecimento desempenha um papel essencial na asseguarção da qualidade dos produtos siderúrgicos após a etapa de conformação a quente.

Palavras-chave: Endireitamento, Rolos Cruzados, Simulação Numérica.

ABSTRACT

Cross-rolling straightening plays a fundamental role in the production of metallic alloys. In the steel industry, its application aims to correct distortions in bars after the hot working process. Despite its critical importance, there is a noticeable scarcity of information on this topic in the existing literature. Therefore, this work provides a comprehensive analysis of the straightening process for steel products using cross-rolling, delving into its fundamental principles, relevant parameters, and numerical simulations. Such knowledge plays an essential role in ensuring the quality of steel products after the hot forming stage.

Keywords: Straightening, Cross-Rolling, Numerical Simulation.

⁽¹⁾ Engenheiro Metalúrgico, Centro Brasileiro de Inovação em Conformação Mecânica, Brasil.

⁽²⁾ Mestre em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Centro Brasileiro de Inovação em Conformação Mecânica, Brasil.

⁽³⁾ Professor, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

1. INTRODUÇÃO

Produtos siderúrgicos, como barras redondas, tubos e barras perfiladas de todos os tipos, geralmente são distorcidos pela conformação a quente. No processo de laminação a quente, por exemplo, as tensões internas induzidas no material durante a deformação podem gerar desvios de retilidade de até 0,4% do comprimento da barra [1]. Estes produtos devem possuir tolerâncias dimensionais estreitas, boa rugosidade superficial e propriedades mecânicas elevadas [2]. Para satisfazer estas severas exigências, a realização de uma operação para eliminação de desvios é requerida após a conformação a quente. O endireitamento contínuo é um processo economicamente vantajoso para este fim. Nesta operação, o empenamento é corrigido e as barras são polidas. A correção do empenamento é realizada pela alteração do estado de tensões do material, gerando uma distribuição uniforme das tensões [3].

Os fundamentos, métodos de trabalho e projetos deste tipo de operação representam uma área especial interessante da tecnologia de conformação e são apresentados neste trabalho.

2. PROCESSO DE ENDIREITAMENTO

Na fabricação de produtos siderúrgicos, após as operações de trefilação e laminação, as barras apresentam níveis elevados de tensões residuais e uma curvatura relativamente grande. O estado de tensão e a curvatura das barras precisam ser corrigidos para atender aos requisitos de produção. Essas correções são feitas através do processo de endireitamento. A norma DIN 24500-7 estabelece os padrões e agrupa os processos de endireitamento em quatro categorias principais que se referem ao endireitamento de barras, perfis, chapas e vigas [4].

Endireitadores de perfis e chapas operam de maneira semelhante. O produto passa por um conjunto de rolos rotativos, conforme a Figura 1. O número de rolos pode variar, mas o princípio é o mesmo. Uma série de curvaturas, todas situadas em um único plano, é aplicada ao produto ao longo da passagem pelos rolos. Maiores números de rolos permitem atingir maiores níveis de planicidade [5]. Trilhos ferroviários também são endireitados passando por conjuntos de rolos alternados como os da Figura 1.

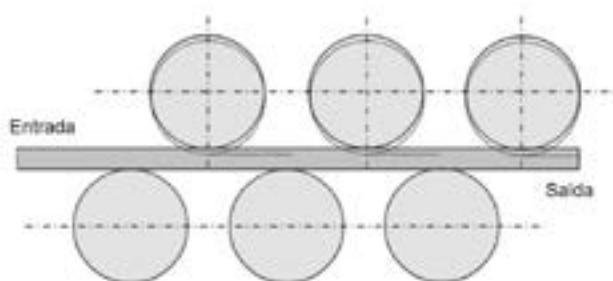


Figura 1: Endireitamento esquemático de trilhos ferroviários [6].

Para barras, o problema é um pouco diferente. Enquanto os trilhos tendem a dobrar em um plano devido aos diferentes momentos de inércia de sua seção, as barras redondas podem dobrar livremente em três dimensões. Por esta razão, o endireitamento destes produtos geralmente é realizada em dois planos perpendiculares [7], como mostrado na Figura 2.

As endireitadeiras de rolos cruzados (Figura 2) são equipamentos amplamente utilizados na indústria de transformação por conciliar ótimos resultados e simplicidade operacional. Usualmente, a máquina trabalha com dois rolos hiperbólicos. Nesta configuração, um rolo é convexo e outro é côncavo. Durante a operação, ambos giram na mesma direção. Ao passar através da máquina, devido ao atrito, o material é rotacionado no sentido contrário e submetido a compressão [8].

Durante o endireitamento, a barra distorcida é forçada sob a ação de momentos fletores a dobrar na direção oposta tornando-se reta após a remoção da força [1]. O rolo côncavo controla o nível de flexão da barra, atuando como uma espécie de batente. O rolo convexo, também chamado de rolo endireitador, molda o material ao pressioná-lo contra o rolo côncavo. A barra é submetida a um dado número de revoluções enquanto flexionada. A cada ciclo, a uniformidade das tensões residuais aumenta, de forma que ao final do processo, o material atinge um estado de tensões mais homogêneo.

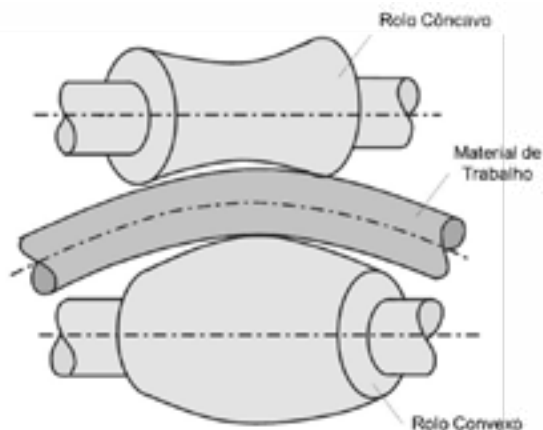


Figura 2: Endireitamento de barras em uma máquina de endireitamento de rolos cruzados [9].

O endireitamento é, fundamentalmente, baseado em uma mudança permanente na forma, que impede que a barra retorne elasticamente à sua curvatura original [1]. A pressão entre os rolos e a barra interfere diretamente no acabamento do produto final. Maiores esforços geram um maior polimento na barra. Esta característica do processo, torna o acabamento dos rolos um aspecto importante. Se a superfície apresentar defeitos como riscos ou rugosidade excessiva, o acabamento da barra será deteriorado.

As principais melhorias alcançadas na barra por meio do endireitamento de rolos cruzados são [5]:

- Redução da curvatura indesejável da barra;
- Redução das tensões residuais trativas próximas à superfície;
- Homogeneização da curvatura da barra;
- Polimento do material.

2.1 PRINCÍPIOS DO PROCESSO DE ENDIREITAMENTO

Durante o endireitamento, um ponto localizado na superfície da barra percorre um caminho ao longo de uma hélice com um eixo dobrado, conforme ilustrado na Figura 3. O estado de deformação resultante pode ser representado como uma flexão de três pontos progredindo ao longo de uma hélice.

Essencialmente, o endireitamento é gerado através da flexão da barra distorcida. Dessa forma, uma maneira de simplificar a mecânica do processo para ampliar a compreensão sobre seus princípios é considerar a barra como uma viga reta submetida a flexão pura. Um par de torques simétricos é aplicado a ambas as extremidades desta viga em seu plano de simetria e a viga exibe uma curvatura constante, κ .

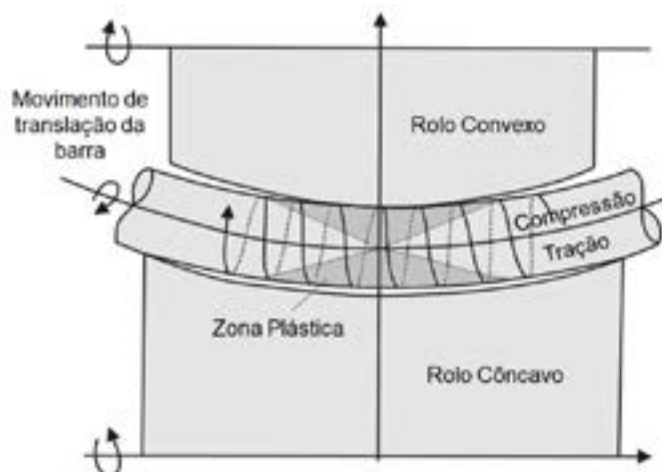


Figura 3: A zona plástica na barra endireitada é propagada ao longo de uma hélice [10].

A superfície neutra é definida como a superfície na interface entre as fibras em tração e aquelas em compressão. Seu eixo neutro é definido como a interseção da superfície neutra e o plano de curvatura. Considera-se que as seções transversais da viga permanecem planas após a flexão e normais ao eixo neutro da viga, enquanto a forma e as dimensões das seções transversais permanecem inalteradas após a flexão.

De acordo com essa suposição, a deformação axial de engenharia ε em uma fibra situada a uma distância y da superfície neutra está relacionada à curvatura da barra por [5]:

$$\varepsilon = y \cdot \kappa \quad (\text{Equação 1})$$

Uma barra reta de seção circular com limite de escoamento $R_{p0,2}$ pode ser dobrada sem que ocorra deformação plástica até uma curvatura [5]:

$$\kappa_y = \frac{R_{p0,2}}{E r_0} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde r_0 é o raio da barra. A barra com uma curvatura inicial $\kappa_0 < \kappa_y$ pode ser endireitada sem que o material seja submetido a deformação plástica. Assim, o endireitamento da barra ocorre na região elástica e, ao interromper a solitação, a barra volta a ter a curvatura κ_0 .

Por esta razão, no endireitamento o material é submetida a uma série de solitações de flexão e uma série de curvaturas κ_i , sendo $|\kappa_0| < |\kappa_i - 1|$, é aplicada na barra. Cada uma das curvaturas impostas conduz à deformação plástica no sentido inverso em relação à sua antecessora. Após o descarregamento, a viga retorna a uma curvatura κ_1 . O objetivo do processo é determinar κ_i de tal forma que $\kappa_1 < \kappa_0$ [5].

Os desvios da retilidade, ou seja, as alturas das curvaturas das barras, geralmente chegam a 0,2 a 0,4% do comprimento da barra no caso de produtos laminados. Durante a flexão e o endireitamento, a barra torta é forçada sob a ação de momentos fletores a dobrar na direção oposta de tal forma que a barra permanece reta após a remoção da carga quando ela sai da máquina. O efeito de endireitamento é, portanto, fundamentalmente baseado em uma mudança permanente na forma, que impede que a barra retorne elasticamente à sua curvatura original [11].

2.2 FUNDAMENTOS DO ENDIREITAMENTO COM ROLOS CRUZADOS

Todas as máquinas de endireitar têm em comum que, a rigor, o início e o fim das barras não podem ser endireitados, pois não há momentos de flexão para as respectivas seções. Este problema é evitado ao endireitar barras e tubos com seção transversal circular em máquinas de dois rolos cruzados.

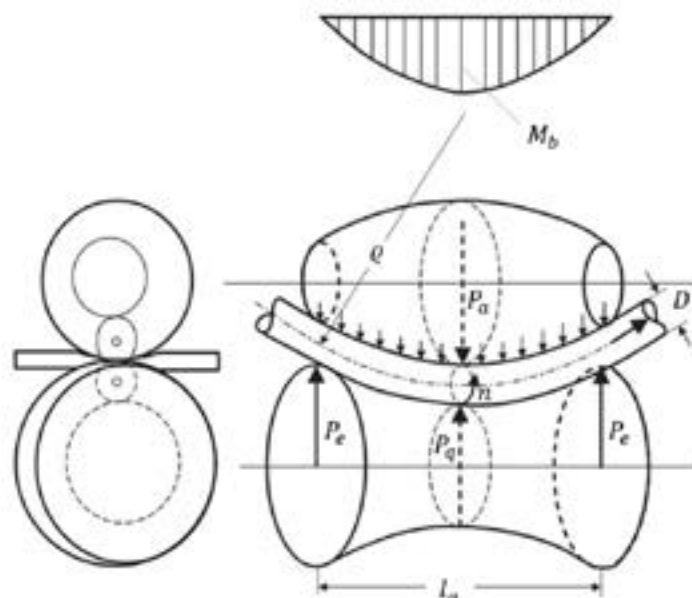


Figura 4: Processo de endireitamento em máquinas de dois rolos cruzados [11].

Como mostra a Figura 4, o processo de endireitamento com dois rolos pode ser entendido como um caso de carregamento de flexão em uma viga duplamente apoiada com carga distribuída. A carga distribuída P_a é aplicada pelo rolo de formato convexo. O apoio é formado por um rolo côncavo. O comprimento de apoio é l_a e as forças de apoio são $P_b = 2P_a$.

2.3 PARÂMETROS DE ENDIREITAMENTO COM ROLOS CRUZADOS

O sucesso da operação de endireitamento em máquinas de rolos cruzados depende dos seguintes fatores:

- Curvatura dos rolos;
- Propriedades mecânicas do material;
- Distância dos rolos;
- Ângulo de endireitamento;
- Pressão dos rolos;
- Flexibilidade da estrutura da máquina;
- Condições pré-definidas em cada rolo.

Nas próximas seções os principais parâmetros do processo são discutidos.

2.4 MOMENTOS, TENSÕES E DEFORMAÇÕES DE ENDIREITAMENTO

Durante o processo de endireitamento, a linha de flexão de uma barra pode ser interpretada como um segmento de arco com raio ϱ . Existe a seguinte relação entre o raio de curvatura ϱ , o módulo de elasticidade E do material da barra, o momento fletor M_b e o momento de inércia para a flexão plástica J_{pl} :

$$\varrho = \frac{E \cdot J_{pl}}{M_b} \quad (\text{Equação 8})$$

O momento fletor M_b é dado por:

$$M_b = P_t \cdot 2y = \sigma \cdot \frac{F}{\pi} \cdot 2y = \sigma \cdot W_{pl} \quad (\text{Equação 9})$$

O termo W_{pl} corresponde ao módulo de resistência para deformação plástica. Este parâmetro está associado ao tipo de seção transversal da barra endireitada. Para barras de seção circular, o módulo de resistência para deformação plástica depende do diâmetro D da barra e é expresso por:

$$W_{pl} = \frac{D^3}{\pi} \quad (\text{Equação 10})$$

Para um determinado diâmetro D , tem-se um valor de módulo W_{pl} da seção de conformação de uma barra com seção circular. Este valor pode ser encontrado em diagramas e tabelas fornecidos por fabricantes. A partir do módulo W_{pl} e do comprimento de apoio l_a , pode-se obter a força de endireitamento P_a .

O módulo de inércia para a flexão plástica J_{pl} é expresso por:

$$J_{pl} = W_{pl} \cdot \frac{D}{\pi} \quad (\text{Equação 11})$$

Se D é o diâmetro da barra, a deformação gerada pelo endireitamento pode ser calculada pela equação:

$$\varphi = \frac{M_b}{E \cdot W_{pl}} = \frac{D}{2\varrho} \quad (\text{Equação 12})$$

Desse modo, a flexão necessária para endireitar a barra é dada por:

$$f = \frac{1}{4} \cdot \varphi_{\max} \cdot \frac{l_0^2}{\pi} \quad (\text{Equação 13})$$

A deformação máxima φ_{\max} ocorre no ponto em que o momento de flexão também é máximo. O maior momento de flexão ocorre na metade do comprimento de apoio. A partir deste valor também é possível calcular a força de endireitamento P_a :

$$P_a = \frac{6 \cdot M_b}{l_0} \quad (\text{Equação 14})$$

Como resultado da carga contínua sobre o comprimento do apoio l_0 , o início e o fim das barras também estão sob a influência de momentos fletores e, portanto, também são endireitados. Muitas vezes, o desvio da retilinidade pode ser reduzido a uma precisão de 0,1 mm por m de comprimento da barra [11].

As endireitadoras podem ser ajustadas ao diâmetro da barra para evitar que elas se desviem ao longo dos rolos. Ao ajustar adequadamente a distância do eixo dos rolos, é possível sobrepor as forças de endireitamento com forças opostas P_q . Estas podem tornar-se tão grandes que, além de um efeito de polimento simultâneo devido ao rolamento suave da superfície da barra, gera um certo alongamento (com uma diminuição correspondente no diâmetro) das barras na direção longitudinal, o que promove o processo de endireitamento.

A posição inclinada dos rolos causa a rotação π da barra em torno do seu eixo e a velocidade de alimentação v_p na direção do eixo. Como resultado, a barra é repetidamente dobrada em todos os lados pela quantidade definida f durante a passagem, de modo que as múltiplas curvaturas espaciais situadas em diferentes planos também podem ser eliminadas. As contracurvas da barra causada pela flexão-endireitamento geralmente podem ser vistas como constantes durante a passagem da barra pela máquina.

A Figura 5 mostra a distribuição de tensão e deformação em uma barra de seção circular submetida ao processo de endireitamento. A fibra neutra da barra é considerada não deformada e fica aproximadamente no meio da barra. O estado de tensão nesta região é nulo, enquanto o restante da distribuição de tensão na seção transversal de flexão da barra segue a curva de escoamento do material (Figura 5).

Para calcular as forças e momentos de endireitamento, pode-se ignorar o componente de tensão elástica e simplesmente usar uma distribuição de tensão retangular a partir do limite de escoamento. Esta simplificação não considera o encruamento do material. Se deseja-se gerar uma margem de segurança nos cálculos, em vez de usar o limite de escoamento k_{f0} , utiliza-se o a tensão de escoamento máxima $k_{f\max}$.

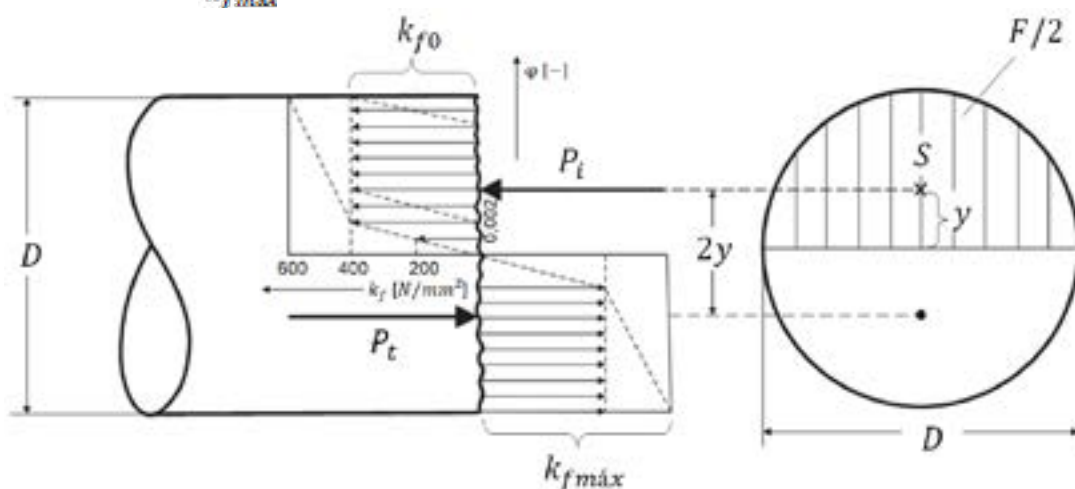


Figura 5: Distribuição de tensão e deformação em uma barra de seção circular submetida ao processo de endireitamento.

O uso do sistema de coordenadas logarítmicas resulta em curvas características retas. O campo de cálculo com os valores de linha inclui a proporção usual $f_{\max} = D/2$.

2.5 PROJETO DOS ROLOS HIPERBÓLICOS

Segundo TALUKDER (1981), a curvatura da região de contato entre a barra e os rolos é o parâmetro mais importante do processo. O projeto do perfil do rolo deve otimizar a linha de contato entre as ferramentas e o material de trabalho.

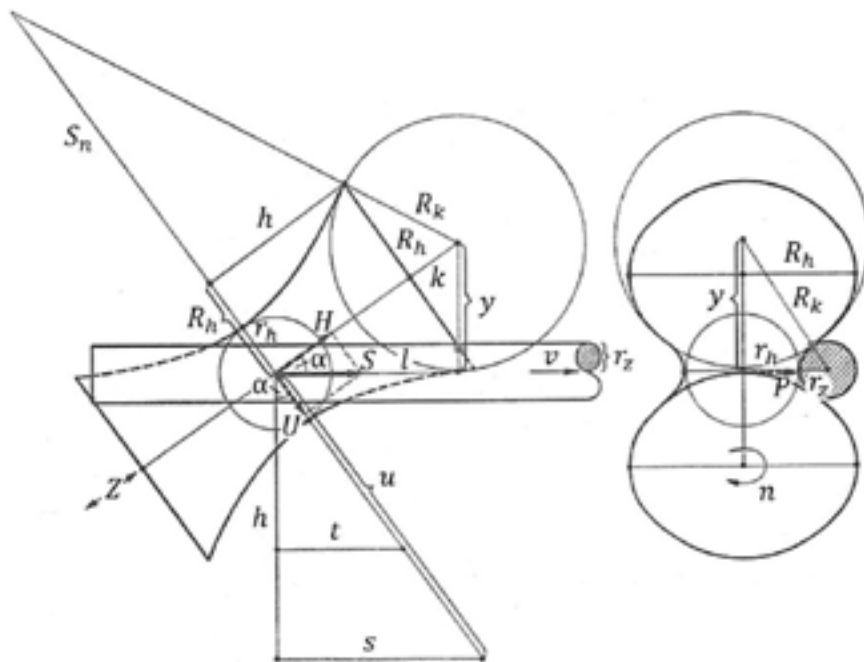


Figura 6: Condições de trabalho de um rolo hiperbólico com uma barra de seção circular [11].

A Figura 6 mostra os parâmetros dimensionais de projeto dos rolos de endireitamento. Os rolos côncavos das máquinas de endireitamento são hiperbólicos de revolução de camada única que seguem a equação:

$$\frac{x^2 + y^2}{r_h^2} - \frac{z^2}{b^2} = 1 \quad (\text{Equação 15})$$

A seção hiperbólica é expressa por:

$$\frac{R_k^2}{r_h^2} - \frac{h^2}{b^2} = 1 \quad (\text{Equação 16})$$

Se R_k é o maior e r_h o menor raio da hiperbólico, e $2h$ é seu comprimento axial, o eixo menor desconhecido da hipérbole é obtido por:

$$b^2 = \frac{h^2 r_h^2}{R_k^2 - r_h^2} \quad (\text{Equação 17})$$

O raio R_k da esfera imaginária de contato, que é envolvida pelo hiperbólico em sua face anterior é calculado por:

$$R_k = \sqrt{R_h^2 + k^2} \quad (\text{Equação 18})$$

A altura y do centro da esfera acima do eixo da barra é definida por:

$$y = \sqrt{(R_k + r_h)^2 - (r_h + r_z)^2} \quad (\text{Equação 19})$$

A distância k do centro da esfera à face hiperbólico é calculado pela equação:

$$h = h_0 \cdot \frac{R_h}{S_m} \quad (\text{Equação 20})$$

Por fim, o comprimento S_m do hiperbólico é expresso matematicamente por:

$$S_m = \frac{b^2}{r_h^2} \cdot R_h \quad (\text{Equação 21})$$

Os parâmetros dimensionais apresentados até aqui são extremamente importantes para a eficiência do processo. Evidentemente, mudanças no perfil de contato alteram o produto final obtido. Conseqüentemente, o controle do desgaste do equipamento é fundamental. O monitorado da força de endireitamento durante o processo é uma forma de controle eficiente.

2.6 ÂNGULO DE ENDIREITAMENTO

O ângulo de ajuste entre a barra e os rolos, chamado ângulo de endireitamento α , é de extrema importância influenciando diretamente o desempenho do processo. O ângulo de endireitamento deve satisfazer os seguintes requisitos [12]:

- Garantir um contato 100% linear na extensão do rolo para toda a faixa de bitolas de trabalho do equipamento;
- Para a barra de maior bitola processada no equipamento, a trajetória desenvolvida durante uma rotação deve ser menor que o comprimento do perfil do rolo.

A faixa de ajuste para o ângulo de inclinação dos rolos hiperbólicos nas máquinas endireitadoras é sempre dimensionado de forma a cobrir a respectiva barra e as flexões necessárias. O ângulo de endireitamento ainda define os níveis de tensões gerados sobre o material. Dessa forma, o ângulo depende do limite de escoamento do material a ser processado e afeta o desgaste gerado nas ferramentas de endireitamento.

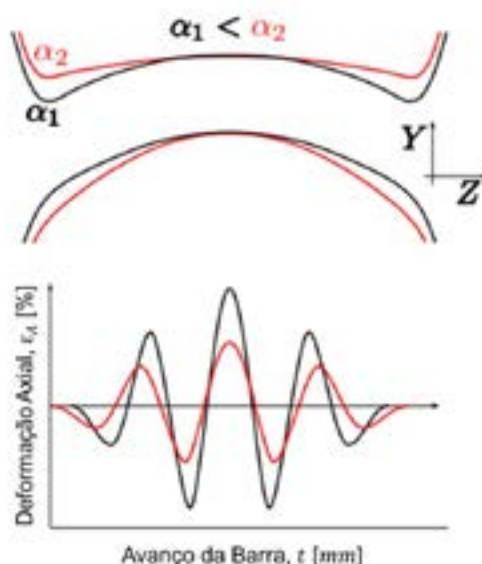


Figura 7: Influencia do ângulo de endireitamento no avanço e na quantidade de flexão aplicada à barra [5].

Segundo MUTRUX (2011) o ângulo α possui influência dupla na deformação, como mostrado na Figura 7:

- Um ângulo α baixo leva a uma diminuição do passo da barra. A velocidade de avanço da barra é reduzida e o número de rotações por determinado comprimento aumenta;
- Um ângulo α baixo aumenta a flexão imposta à barra: a amplitude da deformação axial aumenta.

O hiperbólico tem a capacidade de tocar a barra de seção circular em sua superfície aproximadamente em uma seção helicoidal, de modo que a barra fique em repouso continuamente. Isso acontece sob um ponto muito específico, submetido a uma força S na direção de alimentação. A força S pode ser decomposta em uma componente axial de força que forma um ângulo α entre o hiperbólico e o eixo da barra. Este ângulo depende das dimensões hiperbólicos (R_1, r_1, h) e do raio da barra r_2 . Para calcular o ângulo α , são necessários os seguintes valores auxiliares de acordo com a Figura 6:

$$\sin \alpha = \frac{r_2}{b+r} \quad (\text{Equação 22})$$

A força S na direção de alimentação atua para superar o atrito entre o rolo e a barra e é definida por:

$$S = \mu \cdot F \quad (\text{Equação 23})$$

Para máquinas de dois rolos, o coeficiente $\mu = 0,14$ pode ser considerado. A força S pode ser decomposta em uma componente de força axial:

$$H = S \cdot \cos \alpha \quad (\text{Equação 24})$$

E em uma componente de força circunferencial:

$$U = S \cdot \sin \alpha \quad (\text{Equação 25})$$

2.7 EQUIPAMENTO DE ENDIREITAMENTO

A Figura 8 mostra um exemplo de gráfico utilizado na seleção do equipamento. O dimensionamento e os limites dos equipamentos de endireitamento são determinados a partir do limite de escoamento ($R_{p0,2}$) e a bitola (D) do material.

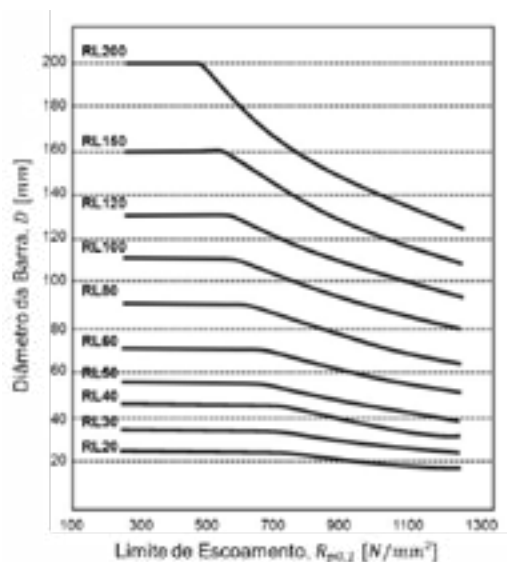


Figura 8: Gráfico para seleção do equipamento de endireitamento.

As máquinas são projetadas de forma que permitam a flexão suficiente do material para ultrapassar o limite de escoamento. Logo, todas as tabelas e gráficos fornecidos pelos fabricantes são baseadas no limite de escoamento dos materiais que serão trabalhados.

Tabela 1: Especificações de diferentes modelos de máquinas de endireitamento.

Modelo	RL30	RL40	RL60	RL100	RL150	RL200
Diâmetro [mm]	6 - 34	12 - 50	10 - 75	16 - 110	25 - 180	30 - 200
Velocidade [mm/min]	250	250	150	120	100	80
Potência [kW]	2x40	2x60	2x75	2x120	2x150	2x250
Ângulos [°]	10 - 22	10 - 22	10 - 22	10 - 22	10 - 22	10 - 22

2.8 VELOCIDADE DE ENDIREITAMENTO

O ângulo de endireitamento também influencia a velocidade de deformação desenvolvida no processo. A utilização de ângulos maiores resulta na passagem da barra com maior velocidade e menos giro. Conseqüentemente, a velocidade de deformação é mais alta. Com relação aos movimentos, as condições apresentadas a seguir se aplicam a um rolo de endireitamento hiperbólico com uma barra de seção circular.

Se a circunferência da barra é $w = 2\pi r_b$, o avanço por revolução da barra é:

$$t = w \cdot \tan \alpha \quad (\text{Equação 27})$$

Sendo $2l$ o comprimento de contato, o número de ações de endireitamento que são exercidas em cada ponto da superfície da barra enquanto passa pelo rolo de endireitamento é:

$$K = \frac{2l}{t} \quad (\text{Equação 28})$$

Sendo $u = 2\pi r_r$ a menor circunferência do rolo, o avanço da barra por revolução é de pelo menos:

$$s = u \cdot \sin \alpha \quad (\text{Equação 29})$$

A velocidade de alimentação v_f está associada ao número de rotações do rolo por minuto n :

$$v_f = s \cdot n \quad (\text{Equação 30})$$

3. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO DE ENDIREITAMENTO

Para um projeto de produto ideal, o conhecimento abrangente do processo de fabricação é essencial para a melhor utilização das vantagens relacionadas ao processo e, assim, para garantir as características ideais do produto. Isso é possível através das ferramentas de simulação numérica altamente sofisticadas que consideram as peculiaridades dos processos, bem como as propriedades do componente.

A simulação representa matematicamente um processo. Graças a disponibilidade atual de softwares rápidos e hardwares poderosos, os modelos matemáticos empregados fizeram grandes avanços nos últimos anos no que diz respeito à largura de banda dos aplicativos, bem como à precisão de suas previsões [13].

Softwares comerciais baseados no Método de Elementos Finitos (Finite Element Method - FEM) possibilitam a solução de problemas mecânicos estruturais que surgem durante a fase de desenvolvimento do produto e a análise da evolução e distribuição local das características termomecânicas e elásticas de um processo de fabricação.

A simulação do processo começa com a criação de uma representação CAD 3D dos objetos do modelo, que serão exportados para os chamados pré-processadores do software FEM. Em seguida, a montagem do modelo é realizada e cada componente é dividido ou discretizado em uma infinidade de elementos com dimensões definidas, os chamados elementos finitos. Além disso, as condições de contorno são aplicadas ao modelo e as características dos materiais são adicionadas. Posteriormente, o modelo completo é transferido para o chamado solucionador, que computará a solução. Em

seguida, os resultados podem ser visualizados e avaliados na forma de gráficos ou animações com a ajuda do chamado pós-processador (VOLLRATH, 2013).

KUBOKI et al. (2010) investigaram o endireitamento de tubos AISI 1045 por elementos finitos. O tubo foi discretizado em uma malha de elementos sólidos e seu comportamento foi assumido como isotrópico. Diferentes modelos foram construídos, usando formulações implícitas e explícitas e diferentes simplificações foram testadas. Compararam-se as previsões dos diferentes modelos em relação às grandezas geométricas. Os tempos de computação variaram entre 2 e 25 dias. Os longos tempos de cálculo podem ser atribuídos aos longos caminhos de deformação impostos à barra e, simultaneamente, aos pequenos intervalos de tempo necessários para levar em conta o complexo contato que ocorre entre o tubo e os rolos devido ao processo de conformação incremental.

ASAKAWA et al. (2010) modelaram o endireitamento com rolos cruzados de barras de S45C usando um modelo de elementos finitos explícito estático. No modelo, assumiu-se que o endireitamento ocorre puramente por flexão alternada. O procedimento foi aplicado a um segmento de 80 mm da barra, discretizado em uma malha com três elementos na direção radial, 10 na circunferência e 20 no comprimento. As comparações entre as deformações axiais medidas durante o endireitamento e as deformações previstas com o procedimento produziram uma concordância muito boa.

CHEN et al. (2010) simularam o processo de endireitamento de seis rolos transversais para medir a força de endireitamento. Segundo os autores, modelos baseados na forma de hipérbole dos rolos resultam em um comprimento da linha de contato entre o material e os rolos excessivamente curto. Dessa forma, o modelo gera resultados com diferença relativamente grande em relação ao processo físico. Portanto, os autores propuseram um novo modelo de contato entre o material e os rolos de endireitamento. A análise numérica foi capaz de prever resultados de força de endireitamento que concordam com os obtidos na prática.

HOON et al. (2003) construíram um modelo de elementos finitos para otimizar os parâmetros do processo de endireitamento multi-escalonado de 14 rolos. Os parâmetros do processo que têm efeito significativo no processo foram identificados por meio de análise de triagem com um planejamento fatorial fracionário. A combinação ideal dos parâmetros do processo foi determinada e validada a partir de experimentos.

YANAGIHASI et al. (2005) usaram uma abordagem FEM explícita estática tridimensional do problema em que apenas a deformação na flexão foi levada em consideração. O aumento na retilidade pode ser previsto qualitativamente, mas o efeito da estampagem lateral foi negligenciado.

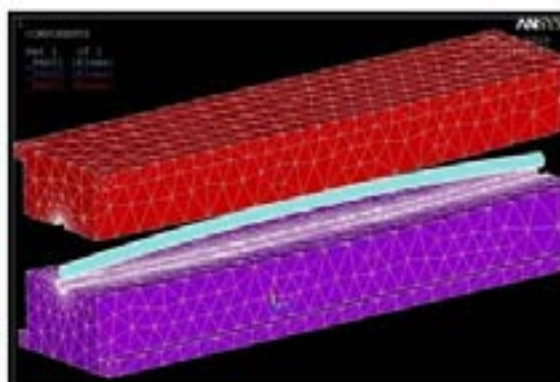


Figura 9: O modelo simplificado de simulação por elementos finitos.

Em uma primeira tentativa de simular o endireitamento transversal de barras, MURATA et al. (2008) construíram um modelo tridimensional do processo. A barra, entrelaçada com elementos sólidos, era acionada, dobrada e estampada pelos rolos rotativos. Essa abordagem consumia muito da CPU e permitia apenas um nível limitado de precisão.

Com o objetivo de reduzir o tempo de computação e aumentar a precisão das previsões, MUTRUX et al. (2009) desenvolveram um procedimento em que apenas a deformação de uma parcela da barra foi modelada. Com base nesse método, MUTRUX et al. (2011) concentraram-se na previsão do efeito de amolecimento que ocorreu ao endireitar barras SAE 1144 de 25 mm de diâmetro com um determinado conjunto de rolos sob diferentes parâmetros de processo, simulando o processo com um custo razoável de CPU, um conjunto adequado de equações constitutivas e os valores de tensão de escoamento, mas ainda custa muito tempo para calcular.

DVORKIN & MEDINA (1989) propuseram um modelo simples de elementos finitos para análise do processo de endireitamento de tubos sem costura. Os resultados demonstraram que o processo poderia eliminar a distorção dos tubos e melhorar a qualidade geométrica através da análise numérica.

Os parâmetros do processo de endireitamento devem ser selecionados com base na avaliação quantitativa precisa dos estados de tensão e deformação e da retilinidade da barra durante e após o processo. No entanto, geralmente os parâmetros são definidos a partir de tabelas, modelos matemáticos simples, com base na experiência dos operadores ou por experimentos de tentativa e erro. Essas abordagens são insuficientes para fornecer informações quantitativas precisas sobre o mecanismo de endireitamento e resultam em retilinidade insatisfatória das barras.

ZHANG & YANG (2017) propuseram um modelo simplificado para a análise numérica do processo de endireitamento de tubos (Figura 9). Os autores assumiram que a distribuição total da deformação no estado estacionário durante o endireitamento é semelhante àquela que se desenvolve quando o material é simplesmente dobrado e estampado entre os rolos sem rotação e avanço. Portanto, um estado de flexão puro típico pode ser assumido, pois o raio de curvatura do perfil circular é uniforme. Segundo os autores, o modelo simplificado pode ser usado para obter o raio de curvatura do perfil dos rolos, a fim de controlar a retilinidade do tubo abaixo de um limite tolerável.

4. CONCLUSÕES

Neste artigo, foram discutidos diversos aspectos relacionados ao processo de endireitamento de produtos siderúrgicos. Este estudo proporcionou uma visão abrangente do processo de endireitamento, abordando seus princípios fundamentais, parâmetros críticos e simulações numéricas. Isso representa um recurso valioso para profissionais da indústria e pesquisadores que buscam compreender e otimizar o processo. Em resumo, o processo de endireitamento desempenha um papel fundamental na fabricação de produtos siderúrgicos de alta qualidade, permitindo a correção de deformações e a obtenção de retilinidade adequada. A seleção adequada de parâmetros, juntamente com o uso de simulações numéricas, contribui para melhorar a eficiência e a qualidade do processo de endireitamento.

5. REFERÊNCIAS

- [1] SOLINGEN, H.M., Walzen- und Rollen-Richtmaschinen für Rundstangen, Rohre und Profilstäbe, Springer-Verlag, 1956.
- [2] BOYER, H. E, Cold Finished Steel Bars, in AMERICAN SOCIETY FOR METALS, Committee on Carbon and Alloy Steel, Metals Handbook, 9^o ed., p.215-251, 2002.
- [3] SMITH JR., RICHARD P., The Effect of the Number of Leveling Rolls on the Straightening Process, 2002.
- [4] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 24500-7:1971-04: Walzwerkseinrichtungen; Walzwerke für Stahl, Begriffe der Einrichtungen zum Richten und Strecken, 1971.
- [5] MUTRUX A., A Procedure for the Simulation of the Cross Roll Straightening Process, Tese de Doutorado, ETH Zurich, 2011.
- [6] SRIMANI, S.L., BASU, J., An investigation for control of residual stress in roller-straightened rails, J. Strain Analysis, Vol. 38, No.3, 2003.
- [7] BALIC J. & NASTRAN M., An on-line predictive system for steel wire straightening using genetic programming, Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2002.
- [8] WU, J. B. A Study on the Precision Modeling of the Bars Produced in Two Cross-Roll Straightening. Journal of Materials Processing Technology, p.202-206, 1999.
- [9] TALUKDER, N.K., JOHNSON, W., On the arrangement of rolls in cross-roll straighteners, Int. J. Mech. Sci., Vol. 23, 1981.
- [10] FANGMEIER, R., Untersuchungen über das Richten von Rundstäben in zwei-Walzen-Richtmaschinen, Doctoral Thesis, Technischen Hochschule Clausthal, 1966.
- [11] MÄKELT H., Walzen- und Rollen-Richtmaschinen für Rundstangen, Rohre und Profilstäbe, Jg. Heft, 1956.
- [12] HAUKE, V. Structural and residual stress analysis by non-destructive methods. Germany: Elsevier, 1997.

- [13] VOLLRATH K., Simulation of forging processes, Industrieverband Massivumformung, 2013.
- [14] KUBOKI, K., HUANG H., MURATA M., YAMAGUCHI Y., KURODA K., Fem analysis of tube straightener adopting implicit scheme. Steel Research International, 2010.
- [15] ASAKAWA M., URABE M., NISHIMURA K., HAMADA R., AIZAWA S., AMARI M., Theoretical and experimental analysis of roller leveller straightening for coiled bar. Steel Research International, 2010.
- [16] CHEN M., JIANG X.M., ZHAO Z.X., HUANG X.B., Innovation in the Computing System of Straightening Force. CHIN J OF MECH ENG, Vol.23(2010), p.1-7.
- [17] HOON H., JIN H. H., HYOUNG W. L., Optimization of a roller levelling process for Al7001T9 pipes with finite element analysis and Taguchi method, INT J MACH TOOL MANU, Vol.3(2003), p.345-350.
- [18] YANAGIHASI, T., HAMA, T., ONODA, Y., ASAKAWA, M., Effect of plastic ratio and repeat bending on straightness in two-roll straightening. J. Jap. Soc. Tech. Plast, Vol.46(2005), p.972-976.
- [19] MUTRUX, A., BERISHA, B., HOCHHOLDINGER, B., HORA, P., Numerical Modelling of Cross Roll Straightening, LS-DYNA Anwenderforum, 2008.
- [20] DVORKIN E.N., MEDINA F.M., Finite element models for analyzing the straightening of steel seamless tubes, J. Eng. Ind., 111 (1989), pp. 351-355
- [21] ZHANG Z., YANG H., A Simplified Finite Element Simulation for Straightening Process of Thin-Walled Tube, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 274 (2017) 012150



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil
26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

Rastreabilidade digital de lingotes e tarugos em fornos de aquecimento para forjamento de produtos não seriados

Joel Renato da Silva ⁽¹⁾

RESUMO

Em uma Forjaria de matriz aberta com processos de forjamento de lingotes de diferentes tamanhos e diferentes aços e ligas especiais, é necessário controlar a rastreabilidade dos produtos carregados e informações de parâmetros de aquecimento e deformação. O processo convencional de rastreabilidade em fornos requer anotações manuais em formulários em que é necessário desenhar os lingotes e anotar as características dos produtos a cada etapa de aquecimento. Essas transcrições são suscetíveis a falhas e dificuldades na visualização de posições do produto dentro do espaço de enforamento. O trabalho propõe uma forma eletrônica de fazer o mapeamento da carga com facilidade de posicionar, arrastar os objetos que representam os produtos carregados nos fornos de aquecimento, com integração com sistema MES (Manufacturing Execution System), ERPs (Enterprise Resource Planning) e sistema de análise de dados. O sistema proposto de tracking pode ser operado via web por dispositivos móveis e permite a atribuição de informações de tempo de ciclo de aquecimento com alertas por tipo de produto, garantindo a melhor programação na área produtiva e conseqüentemente, reduzindo as perdas por excesso de tempo de aquecimento, otimização do consumo de gás por carga produzida e redução de NVAA (Non Value Added Activities)

Palavras-Chaves — Rastreabilidade, digitalização, fornos de aquecimento, prensas de matriz aberta, sustentabilidade.

⁽¹⁾ Engenheiro de Produção, Engenheiro de Processos, Villares Metals – Sumaré-SP, joel.silva@villaresmetals.com;

Digital traceability of ingots and billets in non-series production heating furnaces

ABSTRACT

In an open die Forging with forging processes for ingots of different sizes and different steels and special alloys, it is necessary to control the traceability of loaded products and information on heating and deformation parameters. The conventional traceability process in furnaces requires manual notes on forms in which it is necessary to draw the ingots and note the characteristics of the products at each heating stage. These transcripts are susceptible to failures and difficulties in visualizing product positions inside the furnace. The work proposes an electronic way of mapping the load with ease of positioning, dragging objects that represent the products loaded in the heating furnaces, with integration with the MES system (Manufacturing Execution System), ERPs (Enterprise Resource Planning) and data analysis system. The proposed tracking system can be operated via the web by mobile devices and allows the attribution of heating cycle time information with alerts by type of product, guaranteeing the best programming in the production area and, consequently, reducing losses due to excess heating time. heating and optimization of gas consumption per load produced and NVAA (Non Value Added Activities)

Keywords — Traceability, digitization, heating furnaces, open die presses, sustainability.

1. INTRODUÇÃO

A rastreabilidade de um produto é um requisito das normas ISO9001, IATF16949 e AS9100, descrevendo [1] “A organização deve usar meios adequados para identificar saídas quando isso for necessário assegurar a conformidade de produtos e serviços.” “A organização deve manter a identificação da configuração dos produtos e serviços a fim de identificar quaisquer diferenças entre a configuração atual e configuração requerida.

O termo rastreabilidade é definida [2] como a um atributo que permite a identificação da origem de um item expedido, além do registro e rastreamento de peças, processos e materiais usados na produção, por meio de um número serial ou lote. O rastreamento, assim, define onde o produto se encontra durante o processo de produção. Quanto melhor o processo de rastreamento dos materiais, maior a garantia de gestão e mais precisos são os inventários, permitindo o monitoramento da rastreabilidade de itens e tornando os processos mais eficientes.

A base dos sistemas de rastreabilidade é a identificação do produto, nesse contexto, [3], amplas gamas de tecnologias podem ser empregadas para garantir a rastreabilidade do produto como: marcações no próprio produto utilizando punções, canetas elétricas, etiquetas ou mesmo através de documentos e adesivos contendo código de barras, QR codes e tecnologia RFID (ondas de rádio para identificar automaticamente pessoas e objetos), tornando cada item (produto) único e exclusivo.

As principais vantagens de um sistema de rastreabilidade são [4]:

- Promover identificação dos produtos para evitar mistura de lotes e produtos similares;
- Ter a capacidade de apurar em qual etapa do processamento ocorreram falhas (não conformidade);
- Criar um banco de dados local para cada setor responsável pelas etapas de processamento e manufatura, com o intuito de possibilitar uma análise mais profunda e precisa de cada produto e respectivas incidências ou reincidências de não conformidades.

2. RASTREABILIDADE DE PRODUTOS COM PROCESSAMENTO A QUENTE

2.1 – Modelo de rastreabilidade manual

Na Villares Metals os produtos são rastreados do início do processo de fundição até a expedição do produto acabado conforme Figura 1. Nesse processo são usados vários tipos de identificação como marcação com giz, giz térmico, marcador industrial, etiquetas metálicas, etiquetas adesivas ou tipagem por puncionamento.

Quando se trata de um processo em que o produto é aquecido a faixas de temperaturas em torno de 1200 °C os tipos de identificações possíveis são restritos.

Nesse trabalho, vamos usar a etapa de processo dentro do departamento de Forjaria, Figura 2, onde são recebidos lingotes após fundição com dimensões variadas e com ampla variedade de aços e ligas especiais.

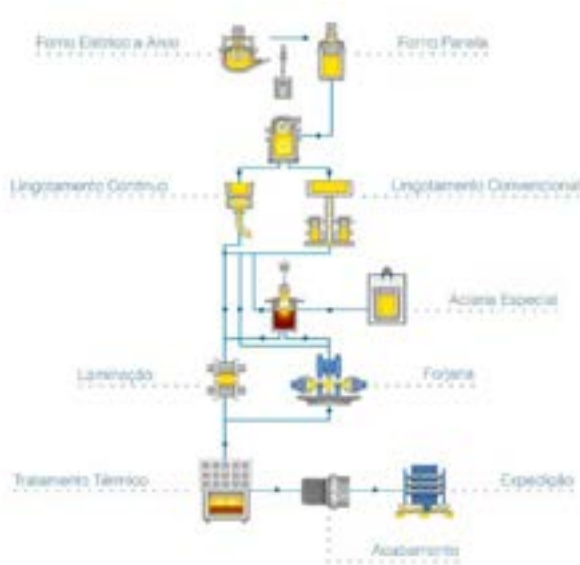


Figura 1: Processo simplificado Villares Metals [5]

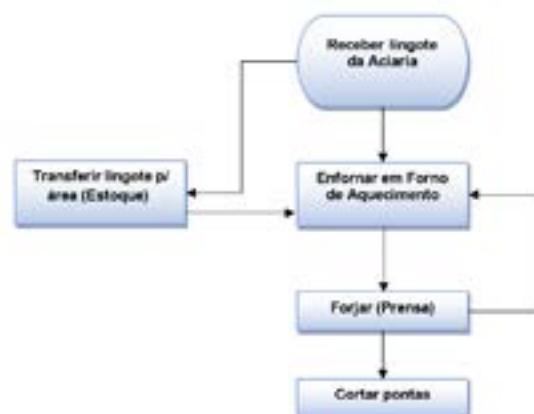


Figura 2: Etapas de processamento dentro da Forjaria da Villares Metals

Nessa etapa do processo a identificação dos lingotes é realizada com giz térmico e placa metálica. Essas identificações não suportam a faixa de temperatura dos fornos de aquecimento e mesmo com identificação com placa metálica não é suficiente pois não suporta o processo de deformação à quente nas prensas.

Dessa forma o método para manter a rastreabilidade dentro dos fornos de aquecimento, é realizado por meio de um mapeamento manual de posições das peças dentro do forno, conforme Figuras 3.

Em vários tipos de materiais são aplicados vários calores durante o processo de forjamento, portanto o lingote é retirado do forno e destinado à prensa onde sofre a conformação mecânica e após essa etapa retorna ao forno com outra dimensão, e assim sucessivamente até o final do processo ao qual se obtém o produto forjado. Em cada etapa de retorno do material ao forno de aquecimento, o operador deve redesenhar todo o mapa novamente. Um exemplo de mapeamento após retorno ao forno é mostrado na Figura 5.

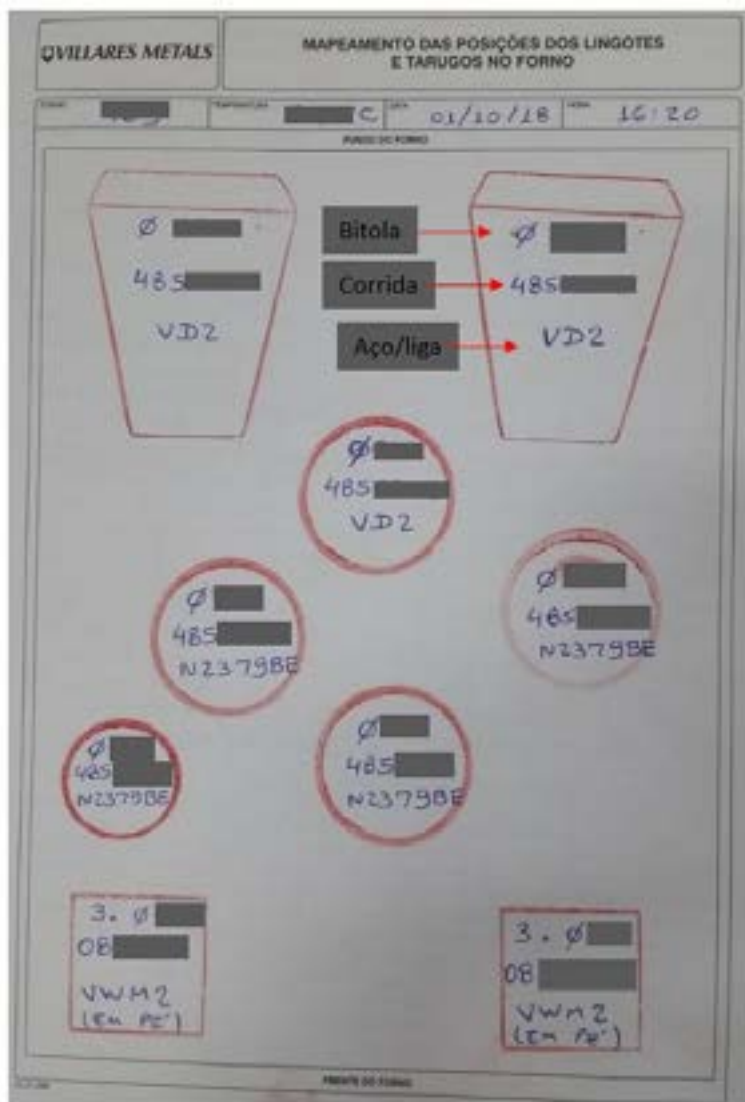


Figura 3: Exemplo de mapeamento de forno com lingotes em pé e deitados com corridas e aços diferentes

Esse modelo de mapeamento possui algumas vantagens que são:

- Baixo custo e facilidade de manuseio por parte dos operadores.
- Facilidade de alteração e inclusão de observações a qualquer momento
- Independência de sistemas e pode ser feito em locais sem rede e sem computadores.

Em contrapartida os pontos negativos deste modelo de mapeamento manual são:

- Tempo excessivo para fazer os registros manuais
- Alta probabilidade de erro na transcrição de informações
- Excesso de papel gerado.
- Dificuldade em resgatar o histórico de enformamento e reenformamento.
- Falta de integração com sistemas supervisórios e MES (Manufacturing Execution System)
- Ausência de rastreabilidade e conexão com variáveis de processo
- Imprecisão no custeio da etapa de aquecimento.
- Pouca interação com as etapas seguintes, necessitando aos operadores das prensas consultarem os mapas para obter informações do material de cada forno.
- Operadores de prensa não visualizam o horário que o material estará liberado para forjamento.

Em face dos inúmeros pontos negativos desse processo de mapeamento e rastreabilidade manual foi proposto o desenvolvimento de um novo modelo de mapeamento que visa mitigar as desvantagens do modelo manual.

2.2 – Modelo proposto para rastreabilidade digital

Dentro da hierarquia de automação Figura 4 foi proposto um desenvolvimento de uma aplicação que se encaixe nesse modelo, ficando essa aplicação no nível 3, conectado aos sistemas MES e ERP (Enterprise Resource Planning). O sistema foi batizado como @TrackFor, desenvolvido na plataforma SAP MII - Manufacturing Integration and Intelligence.

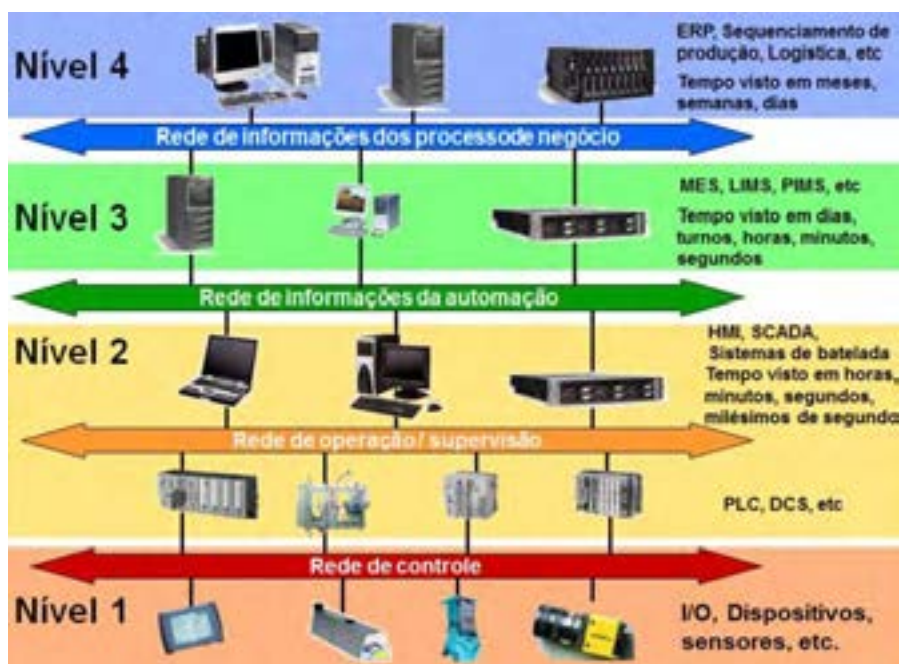


Figura 4: Tipologia baseada no conceito de camadas ISA 95 [6]

O Modelo de rastreabilidade digital proposto tem como objetivo os seguintes benefícios:

- Eliminação de papel e gastos com arquivamento.
- Consulta histórica online dos mapas de enformamento evitando desperdício de tempo para resgatar os registros.
- Redução do tempo de elaboração e transcrição dos mapas de forma manual.
- Redução de NVAA (Non Value Added Activities) devido ao deslocamento desnecessário de operadores.
- Visualização de todo o processo de enformamento e reenformamento.
- Melhoria da rastreabilidade ao longo do processo de enformamento, reenformamento e forjamento.
- Tempo real de aquecimento para cada ordem de produção e exatidão no custeio do produto.
- Visualização ampla de todos os fornos com horário de planejamento de forjamento, possibilitando a redução de perda de gás e tempo excessivo de enformamento.
- Maior integração com sistemas como Braincube (software de inteligência artificial industrial e big data) com possibilidade de cruzamento de dados e demais variáveis de processo.
- Otimização de cargas

- Redução do tempo de ciclo térmico
- Melhoria da qualidade do produto

2.3 – Conceitos do ®TrackFor

O sistema desenvolvido permite o cadastro dos tamanhos em escala tanto dos fornos quanto dos lingotes, facilitando a localização e melhoria visual do mapeamento dos produtos.

O sistema ®TrackFor recebe os dados da operação de aquecimento do SAP e do sistema MES, através de uma interface, e com isso possui todas as informações necessárias para o processamento do material. O sistema pode ser acessado via navegador WEB e com isso possibilita também sua utilização em sistemas mobile como tablets e celulares.

A interface de trabalho é dinâmica e de fácil utilização com visão geral dos fornos, temperatura real e peso da carga conforme Figura 5. A aplicação de filtros de busca de produtos como aço/liga, corrida e número de ordem de produção facilitam a utilização (Figura 6). A ferramenta permite o reposicionamento da peça dentro do forno de forma dinâmica e intuitiva conforme representada na Figura 9.

A integração com os outros sistemas garante que as informações do ®TrackFor sejam enviadas para o sistema MES e conseqüentemente para os sistemas ERP (SAP) e big data como Braincube.

O sistema trabalha com rastreabilidade por peça conforme mapa representado na Figura 7, garantindo que todos os dados de processos referentes à uma única peça, sejam rastreados do início ao fim do processo, trazendo uma vantagem enorme em relação ao processo manual com informações apenas por lote.

A função de definição de data e hora de final de ciclo Figura 8, pode ser realizada por lógica dentro do sistema, conexão com sistemas supervisórios ou via entrada manual. Essa função garante a visualização no processo de forjamento através de cores e alertas que indicam os produtos que estão liberados para forjamento, melhorando a micro programação diária no chão de fábrica.

Existe também a integração do sistema com as prensas que vão receber o material a ser forjado. Essa integração ocorre ao retirar a peça do forno (Figura 9) e ao indicar o destino (Figura 10), o sistema já sinaliza na prensa o número da ordem e peça que foi retirada do forno. A operação da prensa ao processar o material também indica em qual forno vai retornar o produto e quais suas dimensões, conforme representado na Figura 11. Dessa forma garante-se que o mapa fique com o desenho mais próximo do real, facilitando o mapeamento e sua localização nas etapas seguintes.



Figura 5: Tela inicial ®TrackFor, com visualização dos fornos



Figura 6: Tela de listagem de produtos a serem enforados



Figura 7: Tela de forno com mapeamento real de lingotes



Figura 8: Tela destinada à definição de data e hora de final de ciclo



Figura 9: Opções após selecionar a peça dentro do forno



Figura 10: Configurações de destino do material após retirada do forno de aquecimento.



Figura 11: Tela de visualização do operador de prensa, com campos de indicação de dimensões.

3. CONCLUSÃO

O sistema de rastreamento desenvolvido cumpre o papel além da rastreabilidade do produto, e fornece informações precisas ao chão de fábrica sobre o posicionamento real do produto, melhorando a gestão e micro programação como um todo, além das diversas conexões com outros sistemas de gestão. Essa aplicação pode ser desenvolvida e adaptada para outros processos como Tratamento Térmico e gestão de estoque de produtos, com configurações precisas de posicionamento físico de acordo com o mapeamento da área e níveis de estoque.

AGRADECIMENTOS

Ao diretor Industrial Luiz Henrique de Lima Castro e o Gerente de Produção Alexander Marcelino dos Santos pelo apoio irrestrito ao desenvolvimento do projeto e desse trabalho.

Referências

- [1] AS 9100, 2016, item 8.5.2 identificação e rastreabilidade.
- [2] Moura, R. A., Carillo Jr, E., Banzato, E. & Gasnier, D.G. (2004). Dicionário de logística. São Paulo: Imam.
- [3] RAMALHO, T. S. et al. Internet das coisas a serviço da defesa: proposição de um sistema de rastreamento de armamentos. RASI- Revista de Administração, Sociedade e Inovação, Volta Redonda/RJ, v. 6, n. 1, p. 43-59, jan.-abr. 2020. Disponível em: <http://oaji.net/articles/2020/5433-1585089901.pdf> Acesso em 29 de ago. 2023
- [4] Silva, Anderson Rogerio, Um estudo sobre rastreabilidade visando ao controle de processos. DOI: 10.31510/infra.v17i1.796
- [5] Site <https://www.villaresmetals.com.br/villares/pt/Empresa/Producao> Acesso 29 de ago. 2023
- [6] Laizo Filho, Wilson, desmistificando as interfaces de automação com os sistemas corporativos/erps1, 68º congresso anual da ABM ISSN 1516-392X



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil

26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de

Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming

Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis

12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

DIMENSIONAMENTO DE EXTRUSORA LABORATORIAL PARA CONFECÇÃO DE FILAMENTO COMPÓSITO PLA- GRAFENO

Adrian Luiz Cinelli ⁽¹⁾
Vitor Sartori Tempestini ⁽²⁾
Alex Fabiano Bueno ⁽³⁾

ABSTRACT

The development of a small-scale extruder for producing low-cost PLA-graphene filament was crucial for advancing new research regarding the applicability of graphene through 3D printing in complex parts. The foundation of this extruder's development relied upon machined components made from AISI H13 Steel and AISI 4140 Steel. The work was conducted by dimensioning all the components, such as the die and screw, as well as determining the necessary criteria and calculations for motor selection, extrusion speed, and temperature control.

Keywords — Extrusion, PLA-Graphene, Polymers

RESUMO

O projeto de uma extrusora de pequeno porte para produção de filamento PLA-Grafeno com baixo custo, foi fundamental para o desenvolvimento de novas pesquisas referente a aplicabilidade de Grafeno por impressão 3D em peças complexas. A fabricação dessa extrusora teve como base peças usinadas em Aço AISI H13 e Aço AISI 4140. O trabalho foi realizado a partir do dimensionamento de todos os componentes, tais como molde e rosca, além de obter os critérios e cálculos necessários para a escolha do motor, velocidade de extrusão, resistências e controle de temperatura.

Palavras chave — Extrusão, PLA Grafeno, Polímeros

⁽¹⁾ Graduando; Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.

⁽²⁾ Graduando; Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.

⁽³⁾ Prof. Dr.; Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.

1. INTRODUÇÃO

No cenário atual da indústria, onde a utilização de componentes eletrônicos e eletromecânicos, a produção de produtos personalizados e com produção em massa a manufatura aditiva, também conhecida como impressão 3D, é uma das principais fontes de inovação de manufatura. [1]

Em extrusoras e misturadoras o processo de compostagem é o processamento, adição e mistura de polímeros fundidos, e são considerados uma forma mais econômica e viável para este tipo de processo [2]. O processo de extrusão tem a rosca extrusora como o principal elemento de uma extrusora, uma vez que além de fazer a mistura e a fusão do material a ser extrudado, a rosca auxilia no processo de transporte do material a ser extrudado, porém, a forma como o material será extrudado dependerá da forma como o molde ou bico será projetado.

O processo de extrusão ocorre de forma contínua sendo alimentado por um funil na região denominada zona de alimentação, local onde ocorre o processo de mistura e fusão do Polilático Lático (PLA), onde é transportado até o molde, sendo então extrudado [3].

O presente trabalho tem como objetivo projetar uma extrusora de pequeno porte e baixo custo para uso laboratorial a fim de realizar estudos sobre a aplicabilidade de novos compósitos na manufatura aditiva, com foco principal no processo de impressão 3D.

2. DESENVOLVIMENTO DA EXTRUSORA

Cada componente de uma extrusora tem um objetivo específico no processo de extrusão, e seu dimensionamento é fundamental para que o processo ocorra de forma apropriada para a produção de filamento de boa qualidade. A rosca extrusora é utilizada para mover (empurrar) e misturar os materiais, a matriz é responsável pelo tamanho e formato do filamento final, os resistores são responsáveis por aquecer e manter a temperatura elevada, entre outros [4].

2.1. Rosca Extrusora

Com base na literatura, é possível estabelecer parâmetros da rosca extrusora conforme a matéria prima utilizada. Durante o desenvolvimento do projeto foi definido o PLA como material a ser utilizado. Uma vez que não foi constatado na literatura bibliográfica necessária para o desenvolvimento de uma rosca extrusora para PLA e através de estudos realizados a fim de definir outro material para o dimensionamento, constatou-se que o Polipropileno (PP) é um material adequado para o projeto, uma vez que ambos os materiais têm pontos de fusão, estabilidade térmica e resistência química semelhantes, possuindo também características mecânicas similares como resistência à tração, tenacidade e ductilidade similares.

2.2.1. Descrição Matemática

Para o desenvolvimento da rosca extrusora foram definidos os valores para o diâmetro (D) em 45 mm, e o comprimento (L) em 540 mm. Com os parâmetros definidos calculamos todos os parâmetros necessários, utilizando para tal as fórmulas vistas em (1) até (7).

Número de passos (P):

$$P = \frac{L}{D} \quad \backslash \quad P = 12 \quad (1)$$

Ângulo do canal (θ):

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{P}{\pi \cdot D}\right) \quad \backslash \quad \theta = 5.09 \quad (2)$$

Largura do Canal (e):

$$e = 0.1 \cdot D \quad \backslash \quad e = 4.5 \text{ mm} \quad (3)$$

Distância entre os canais (W):

$$W = P \cdot \cos(\theta) - e \quad \backslash \quad W = 7.45 \text{ mm} \quad (4)$$

Taxa de compressão (RC):

$$RC = \frac{h_i}{h_f} \quad \backslash \quad RC = 3.82 : 1 \quad (5)$$

Onde h_i é a profundidade da zona de alimentação e h_f é a profundidade da zona de compressão.

Vazão Mássica (G):

$$G = 60 * \rho_0 * \eta F * \pi^2 * h_i * D * (D - h_i) * \frac{W}{W+e} * \text{sen}(\theta) * \text{cos}(\theta) \quad (6)$$

Referência [5] diz que:

- G: vazão mássica (kg/h).
- ρ : densidade = 900 kg/m³.
- N: rotação angular = 12 RPM.
- ηF : eficiência de transporte = 0,25.

Portanto, obtêm-se:

$$G = 0,373 \text{ Kg} \quad (7)$$

Após os cálculos realizados é possível dimensionar as quatro zonas da rosca, sendo elas:

- Zona de Alimentação: Local onde a matéria prima é inserida, iniciando a mistura e homogeneização;
- 1ª Zona de Compressão: Início do aquecimento, e atrito contra o cilindro;
- 2ª Zona de Compressão: Material a ser extrudado é comprimido contra o cilindro iniciando a plastificação;
- Zona de Dosagem: Última zona da rosca extrusora onde atrito entre a massa formada e a resistência mantém o material na temperatura ideal para ser extrudado através do molde.

As dimensões das quatro zonas podem ser calculadas utilizando os valores pré-determinados na Tabela 1:

Tabela 1: Dimensionamento de rosca para polipropileno [5].

Rosca para PP	Zona de alimentação	1ª zona de compressão	2ª zona de compressão	Zona de dosagem	Produção estimada	Velocidade da rosca
Comprimento	1.5D	4D	0.5D	6D		
D (mm)	h(mm)	h(mm)	h(mm)	h(mm)	Kg/h	(rpm)
45	8,4	8,4 a 6,3	6,3 a 2,2	2,2	27	120
60	10	10 a 7,6	7,6 a 2,3	2,3	54	120
90	12,7	12,7 a 7,6	7,6 a 3	3	130	100
120	14	14 a 10	10 a 3,3	3,3	280	100

Os valores calculados para cada zona podem ser visualizados na Tabela 2:

Tabela 2: Dimensionamento de rosca para polipropileno

Rosca para PP	Zona de alimentação	1ª zona de compressão	2ª zona de compressão	Zona de dosagem	Produção estimada	Velocidade da rosca
Comprimento (mm)	67,5	180	22,5	270		

D (mm)	h(mm)	h(mm)	h(mm)	h(mm)	Kg/h	(rpm)
45	8,4	8,4 a 6,3	6,3 a 2,2	2,2	0,373	12

Desta forma, o recomendado seria a obtenção de uma extrusora conforme a Figura 1, que utiliza rosca dupla para melhor mistura do grafeno [6].

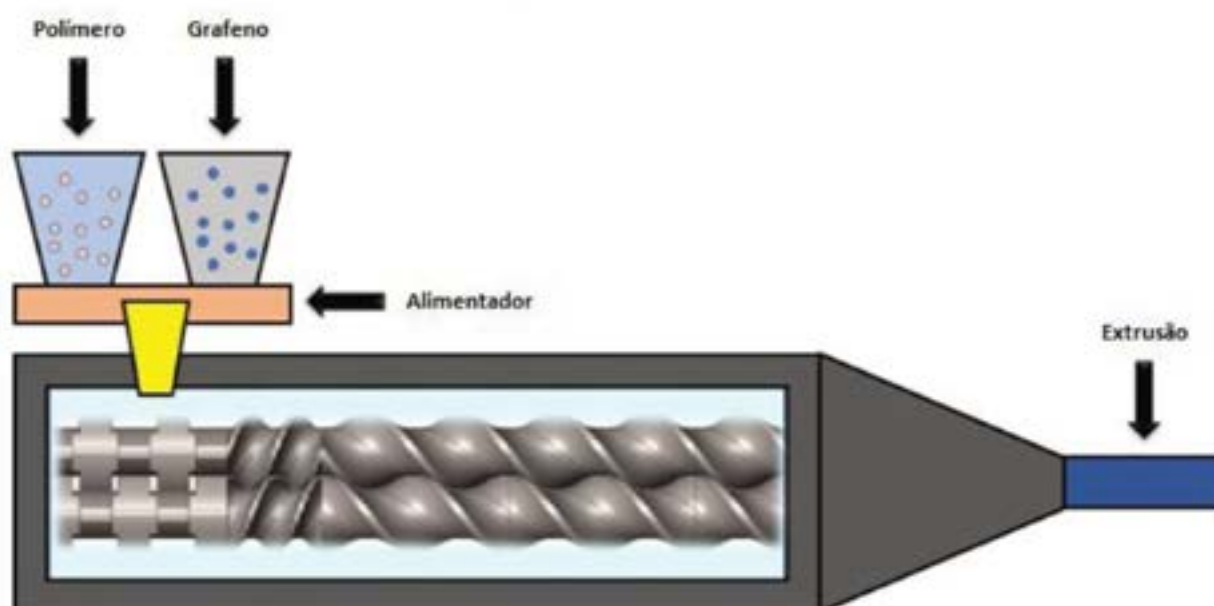


Figura 1: Extrusora com rosca dupla para mistura [6].
Adaptado pelos autores.

Porém, devido ao custo elevado de uma rosca dupla junto com os componentes necessários para sua devida utilização, opta-se pela utilização de uma rosca única de extrusão bem dimensionada, com o objetivo de abaixar o custo do projeto vista na Figura 2.

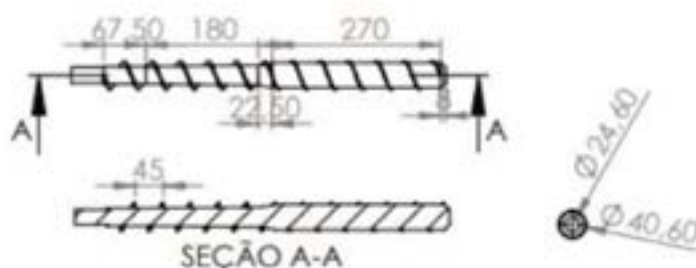


Figura 2: Desenho técnico da rosca extrusora.

2.2. Cilindro

Assim como a rosca extrusora, o cilindro é uma das partes mais importantes do processo de extrusão uma vez que auxilia no aquecimento da matéria prima. No cilindro são acoplados a resistências elétricas que aquecem o cilindro e os termopares que fazem a medida das temperaturas. A combinação do cilindro e da rosca extrusora alimenta o molde com a matéria prima a ser extrudada, construindo assim uma pressão no molde, fazendo com que o polímero seja extrudado através do molde projetado [7]. O desenho técnico do cilindro pode ser visto na Figura 3.

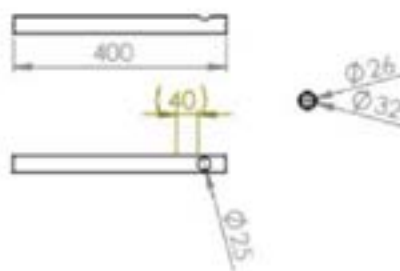


Figura 3: Desenho técnico do cilindro.

2.3. Molde

No processamento de polímeros (extrusão, sopro, entre outros), o molde é o canal projetado para que a massa formada durante o processo flua sendo acoplado em uma das extremidades do cilindro, dando o formato desejado, sendo sua função a distribuição do polímero fundido e plastificado através do molde projetado.[8]

O diâmetro do fio a ser extrudado é de 1.75 mm. O molde projetado pode ser visto na Figura 4.

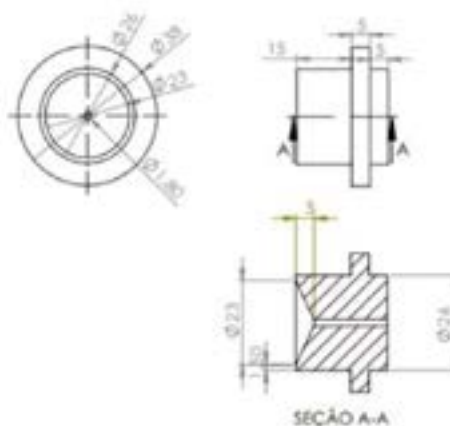


Figura 4: Desenho técnico do molde.

2.4. Montagem da Extrusora

Os componentes da extrusora foram projetados em software de desenho assistido por computador. Após serem projetados, foi feita a montagem do protótipo combinando todas as peças obtendo um modelo completo do protótipo desenvolvido, que pode ser visto na Figura 5.



Figura 5: Extrusora completa

2.5. Motor

Durante o processo de extrusão, o motor tem participação extremamente importante em alguns aspectos, tais como movimentar a rosca com o objetivo de transporte do material, fazer a mistura do

PLA com o grafeno, manter a velocidade adequada para que a condução de energia térmica seja suficiente durante o processo e entre outros [9]. Para isso, foi utilizado o motor de passo NEMA 23, com torque de 3.04 Nm – designado suficiente para o sistema principal, o qual pode ser visto na Figura 6.



Figura 6: Motor NEMA 23

De forma complementar também é necessário um sistema de bobinamento, o qual conta com o motor de passo NEMA 17 com torque de 0,41 Nm. Este motor tem a função de bobinar o filamento recém-extrudado, com o objetivo de organizar o filamento e facilitar o seu uso pós-extrusão.

Visto a utilização de múltiplos motores, é necessário obter a sincronia entre eles para que não haja quebras, rachaduras e/ou imperfeições no resultado desejável, e para esse objetivo ambos os motores foram designados a mesma velocidade de rotação, sendo esta 12 Rotações Por Minuto (RPM, similarmente dado por 0,2 Hz). Para tal, foram calculadas a quantidade de passos por revolução e sua modulação de largura de pulso, cujas podem ser vistas na Figura 7.

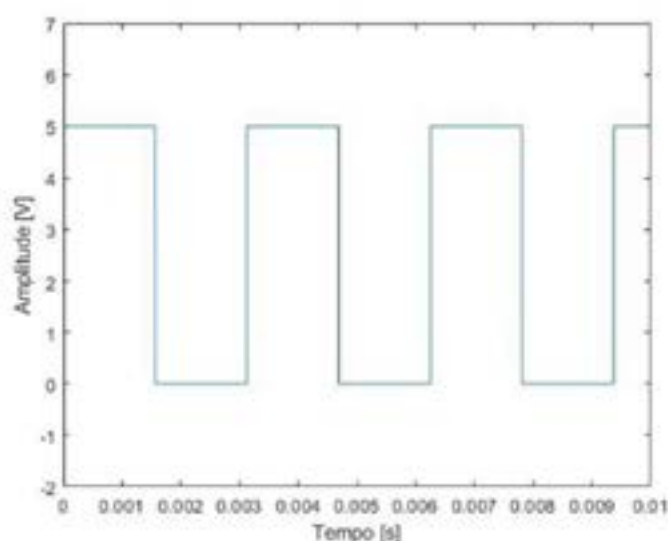




Figura 7: Modulação de largura de pulso para o Motor NEMA 23.

3. CONTROLE DE TEMPERATURA

Durante o processo de extrusão, é necessário aquecer o material até a temperatura de 180 °C para conseguir a mistura [8], a plastificação e a extrusão por si só, e para tal, foram utilizadas duas resistências de 350 W. A primeira resistência está localizada após o funil e serve para pré-aquecer os materiais, de forma a começar a mistura, e também para garantir que a temperatura de extrusão se mantenha independente da temperatura externa, alcançando 80 °C [10]. Tal escolha de temperatura é corroborada pela Tabela 3 [10].

Tabela 3: Defeitos microscópicos na mistura de PLA-Grafeno [10].

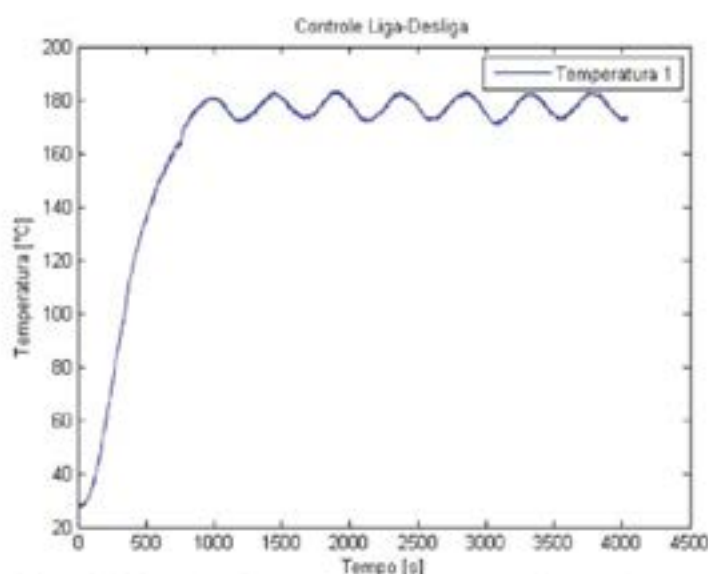
Material	Temperatura no bico de extrusão	Temperatura pós extrusão	Temperatura de transição vítrea	Temperatura de tratamento térmico	Visão microscópica
PLA G F (2%)	225 °C	60 °C	70-75 °C	80 °C	
PLA G F (2%)	225 °C	60 °C	70-75 °C	60 °C	

Vale ressaltar que a temperatura não chega a atingir os 225 °C visto que para a criação do filamento-compósito não é necessário manter a peça quente por tempo prolongado até atingir a mesa quente, diferentemente de uma impressora 3D.

Já a segunda resistência se localiza na primeira zona de aquecimento, com o objetivo de completamente derreter e plastificar o filamento-compósito, chegando na temperatura desejada de 180 °C, e é com essa temperatura que o filamento será extrudado.

Para atingir e manter a temperatura desejada foi utilizado um sistema de controle liga-desliga, onde os termopares estão localizados a 5 cm das resistências, logo há um certo tempo de condução a ser corrigido no código. Desta forma, a primeira vez em que o sistema liga a resistência de pré-aquecimento chega em 64 °C e é desligada, enquanto a temperatura de aquecimento chega a 165 °C e é desligada. Desta forma, após a condução de calor, as zonas estarão com a temperatura adequada.

Após este primeiro ciclo, a temperatura de pré-aquecimento é mantida ao desligar a resistência ao atingir 78 °C, e é ligada novamente ao atingir 76 °C, já a temperatura de aquecimento é desligada caso a temperatura esteja em ascensão e atinja 178 °C, e é desligada caso esteja em descida, e passe por 178 °C. O seu comportamento pode ser visto na Figura 8.

**Figura 8:** Controle de temperatura na zona de aquecimento.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante o desenvolvimento do projeto foi encontrado dificuldades em relação a confecção da rosca extrusora, assim por questões orçamentárias, uma vez que o intuito do projeto é a construção de uma extrusora de baixo custo para realização de experimentos, a solução encontrada foi a utilização de uma broca de quatro guias.

Apesar da não-utilização da rosca ideal ainda houve sucesso na criação de uma extrusora laboratorial para confecção de filamento-compósito PLA grafeno, de forma a obter um filamento de qualidade suficiente tanto para impressão 3D, quanto para testes laboratoriais nos arredores da Universidade Federal de Santa Catarina, os quais foram possíveis imprimir peças de alta-qualidade e também realizar testes como a separação do PLA com o grafeno, por meio da elevação de temperatura e de mistura com outros elementos químicos.

Ademais, também foi útil para a reciclagem de impressões mal-dimensionadas, quebradas ou com falhas, visto que o material utilizado nessas impressões foram quebrados em grânulos e utilizados para a criação de mais filamento com a adição de grafeno, sendo capaz de produzir mais de 0,3 Kg de filamento por hora.

5. PROJETOS FUTUROS

Para projetos futuros, é recomendado a utilização de um controlador proporcional-integral-derivativo com o objetivo de manter a temperatura em uma zona menor de variância, além de diminuir o trabalho manual procurando a temperatura ideal para o código. Além disso, a extrusora será capaz de adquirir erro nulo e também se ajustará melhor em testes com outros aditivos, além do grafeno.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o Professor Doutor Daniel Martins Lima, o Técnico de Laboratórios da Área Física de Controle e Automação Carlos Felipe de Oliveira Raymundo e o Estagiário do Laboratório de Expressões Gráficas Alex Lago de Oliveira por suas valiosas contribuições, além da Universidade Federal de Santa Catarina por providenciar o local de estudo.

REFERÊNCIAS

- [1] JEREZ-MESA, R. et al. Finite element analysis of the thermal behavior of a rewrap 3d printer liquefier. *Mechatronics*, v. 36, p. 119 – 126, 2016. ISSN 0957-4158. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957415816300289>> .
- [2] RAGAERT, K. et al. Machine design and processing considerations for the 3D plotting of thermoplastic scaffolds. *Biofabrication*, v. 2, n. 1, p. 1–8, 2010. Disponível em <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1758-5082/2/1/014107/meta>> .
- [3] *Feed Technology • R. Bras. Zootec.* 39 (suppl spe) • July 2010 • <https://doi.org/10.1590/S1516-35982010001300055>
- [4] Yanjuan Yang, Wuqiang Yang and Hanru Zhong, "Temperature distribution measurement and control of extrusion process by tomography," 2008 IEEE International Workshop on Imaging Systems and Techniques, Chania, Greece, 2008, pp. 170- 174, doi: 10.1109/IST.2008.4659963.
- [5] MANRICH, Silvio. *Processamento de termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes*. São Paulo: Artiber Editora, 2005
- [6] N.M. Nordin, Y.F. Buys, H. Anuar, M.H. Ani, M.M. Pang. Development of Conductive Polymer Composites from PLA/TPU Blends Filled with Graphene Nanoplatelets, *Materials Today: Proceedings*, Volume 17, Part 3, 2019, Pages 500-507, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.328>.
- [7] RAO, Natti S. SCHOTT, Nick R. **Understanding Plastics Engineering Calculations**. Hands- on Examples and case studies. HANSER, 327 Route 21c, Ghent NY 12075, USA, 2012
- [8] GILES JR., H. F.; WAGNER JR., J. R.; MOUNT III, E. M.; *Extrusion: The Defenitive Processing Guide an Handbook*. Estados Unidos da America: Editora Wiliam Andrew, Inc., 2005
- [9] Sarat Singamneni, Malaya Prasad Behera, Derryn Truong, Marie Joo Le Guen, Elspeth Macrae, Kim Pickering, Direct extrusion 3D printing for a softer PLA-based bio-polymer composite in pellet form, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 15, 2021, Pages 938-949, ISSN 2239-7854, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.044>.
- [10] Mohammed Basheer EP, S. Rajkumar, R. Karthikeyan, V.P. Pradeep, K. Marimuthu: Microstructural characterization and defects analysis of FDM based composite material (PLA-G-CF), Pages 2303-2309, 2022



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil
26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG
25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental
Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

Análise da substituição de um parafuso com adesivo microencapsulado através da implementação de um parafuso com coeficiente de atrito controlado e da estratégia de aperto por torque e ângulo de deslocamento

Analysis of the replacement of microencapsulated adhesive screw through the implementation of screw with controlled friction coefficient and tightening strategy using torque and angle displacement

Pereira. Wagner ⁽¹⁾

Garcia. Roberto ⁽²⁾

Medeiros. Jorge Luis Braz ⁽³⁾

Biehl, Luciano Volcanoglo ⁽⁴⁾

RESUMO

A definição da estratégia de aperto somada à utilização de um parafuso com coeficiente de atrito controlado elimina a utilização desnecessária de meios auxiliares, que garantem a fixação durante o aperto, como por exemplo, de adesivos microencapsulados. Esse método de travamento, que está presente na rosca do parafuso por meio de adesivos encapsulados, cercadas por uma fina camada de polímero, que ao serem aparafusadas, liberam os seus componentes líquidos de vedação e previnem o afrouxamento dos parafusos devido a vibrações; porém trazem desvantagens durante a aplicação do torque em uma junta aparafusada. Somada à incorreta definição da estratégia de aperto, podem gerar a soltura dos parafusos gerando um torque falso, ou seja, quando é aplicado um torque dentro dos limites de especificação sem gerar a respectiva força tensora. O comportamento variável do coeficiente de atrito afeta negativamente a relação entre torque e força tensora gerada, apresentando uma dispersão nos valores de força de união, diminuindo o rendimento do elemento de fixação. No presente trabalho propõe-se analisar a substituição por um novo parafuso, com revestimento uniforme, somado ao aumento da sua resistência à corrosão através da adoção de uma estratégia de aperto por pré-torque e ângulo de deslocamento, gerando uma maior força de união com um consequente torque resultante, tornando o processo de aperto mais eficiente, pois se utiliza adequadamente das propriedades mecânicas e tribológicas do parafuso.

Key words – coeficiente de atrito, elementos de fixação, processo de aperto, adesivo microencapsulados

⁽¹⁾ Mestrando de Eng. Mecânica; FURG, Brasil, wagner.afp@gmail.com;

⁽²⁾ Consutor; Metaltork; roberto.2.garcia@gmail.com;

⁽³⁾ Prof. Dr. Eng.; FURG, Brasil, jorge.braz@furg.br;

⁽⁴⁾ Prof. Dr. Eng.; FURG, Brasil, lucianobiehl@furg.br;

ABSTRACT

The definition of the tightening strategy combined with the use of a screw with a controlled friction coefficient eliminates the unnecessary use of auxiliary means, which ensure fixation during tightening, such as microencapsulated adhesives. This locking method, present in the screw thread through encapsulated adhesives surrounded by a thin layer of polymer, releases their liquid sealing components and prevents loosening of the screws due to vibrations when screwed in. However, they bring disadvantages during the application of torque in a bolted joint. Combined with the incorrect definition of the tightening strategy, they can lead to screw loosening, resulting in false torque, meaning that torque is applied within specification limits without generating the corresponding clamping force. The variable behavior of the friction coefficient negatively affects the relationship between torque and generated clamping force, showing dispersion in the values of clamping force, reducing the efficiency of the fastener. In this work, we propose to analyze the replacement with a new screw, with a uniform coating, combined with increased corrosion resistance through the adoption of a tightening strategy based on preload torque and angle displacement. This generates a greater clamping force with a consequent resulting torque, making the tightening process more efficient, as it appropriately utilizes the mechanical and tribological properties of the screw.

Keywords: friction coefficient, fasteners, tightening process, microencapsulated adhesive.

1. INTRODUÇÃO

Os parafusos têm papel fundamental nos processos de manufatura, na garantia da integridade e qualidade final do produto. Devido a sua popularidade, criou-se um ambiente propício para a disseminação da desinformação sobre o seu uso e a sua correta utilização, criando conceitos ultrapassados como: “Parafuso é tudo igual” ou “é apenas um parafuso”, sendo infelizmente estes pensamentos os que estão enraizados no senso comum, refletindo o uso inadequado através da propagação de conceitos retrógrados em relação aos processos de aperto, que merecem ser revistos, analisados e consequentemente atualizados e modernizados.

A substituição de um parafuso tem grandes consequências na fixação de uma junta aparafusada, porque ao se alterar o elemento de fixação, estamos alterando propriedades extremamente importantes que necessariamente mudam a força de união que será gerada, através do torque aplicado, prejudicando a união da junta. Os parafusos são suscetíveis a soltura após a sua montagem devido à condição de trabalho, e o seu afrouxamento ocorre, quando são submetidos à vibração, cargas térmicas alternadas e impactos externos, resultando na perda da pré-carga e prejudicando a confiabilidade do produto [1]. Para evitar que isso ocorra em aplicações onde prevenir o seu afrouxamento é essencial para a garantia da segurança, confiabilidade e integridade da estrutura, criaram-se soluções no próprio elemento de fixação para garantir a qualidade do aperto e também foram desenvolvidos diversos métodos de travamentos auxiliares para restringir a sua movimentação, como por exemplo, na utilização de adesivos químicos microencapsulados. [2]

O adesivo microencapsulado é uma película que está presente na rosca do parafuso, composta de reagentes (adesivos) encapsulados e por uma camada de polímero, que ao serem roscados, são destruídas por pressão e tensão de cisalhamento, liberando os componentes líquidos anaeróbicos que são polimerizados, auxiliando na sua vedação após 24 horas. [3] Após esse período, a desmontagem se torna inapropriada, devido à ação das propriedades adesivas, que auxiliam na prevenção à vibração. Cria-se mandatoriamente a necessidade de se substituir o parafuso em possíveis reparos e desmontagens, devido à alteração das propriedades tribológicas da rosca interna da contra-peça, e por isso deve ser certificado que a superfície seja limpa antes da nova fixação do novo parafuso, para garantir que o novo aperto seja realizado nas condições estabelecidas de projeto.

O parafuso proposto apresenta um revestimento superficial uniforme. O seu acabamento superficial é obtido por meio da fosfatização a frio, tratamento que ocorre em temperatura ambiente, que converte o estado de superfícies do tipo metálico em superfícies revestidas com uma camada de

fosfato do tipo bi ou tri catiônico e posterior aplicação de um selante orgânico. Utilizado em preparações de peças para pinturas, dispõe de uma composição cristalina bem definida, proporcionando ótima aderência, e resistente a inúmeros meios corrosivos. A fosfatização pode ser aplicada através de imersão ou spray, sobre o ferro ou em peças confeccionadas em aço carbono.

A soltura dos parafusos também pode ocorrer por afrouxamento devido à incorreta definição do processo de aperto, apresentando uma grande possibilidade de gerarem um torque falso, ou seja, quando a ferramenta aplica um torque especificado dentro dos limites estabelecido, porém sem gerar a respectiva força tensora. Atualmente existem diversos métodos de se aplicar um torque em um fixador, definido com base nas tabelas de classe de resistência, diâmetro nominal, tratamento térmico e tratamento superficial do parafuso, além da utilização da capacidade da ferramenta de aperto, para definir os limites inferiores e superiores de torque, porém deve ser levada em conta a dispersão de energia encontrada durante a realização do aperto, em função da variação do coeficiente de atrito que dissipa energia na rosca e na cabeça do parafuso. Essa dissipação de energia ocorre porque o torque é a quantidade de energia aplicada em uma junta aparafusada para gerar uma determinada força tensora, cuja equação básica do momento de aperto envolvendo elementos de fixação é a seguinte: [4] – [5]

$$M_A = F_v * d * k \quad (1)$$

Para um aperto realizado dentro do regime elástico do parafuso, é possível substituir a força tensora por uma expressão matemática baseada na Lei de Hooke, equação 2, que relaciona o ângulo de aperto e as resiliências dos componentes das juntas, apresentando como condição fundamental para a sua utilização a não deformação permanente da contra-peça e principalmente do parafuso. [4] – [5].

$$\alpha = \frac{360^\circ}{p} * (\partial_s + \partial_p) * F_v. \quad (2)$$

Na figura 1, podemos observar que o ângulo de deslocamento do aperto é a variável que relaciona a força gerada com o torque aplicado durante o processo de aperto.

Figura 1: Relação entre força e torque



Fonte: Elaborado pelos autores

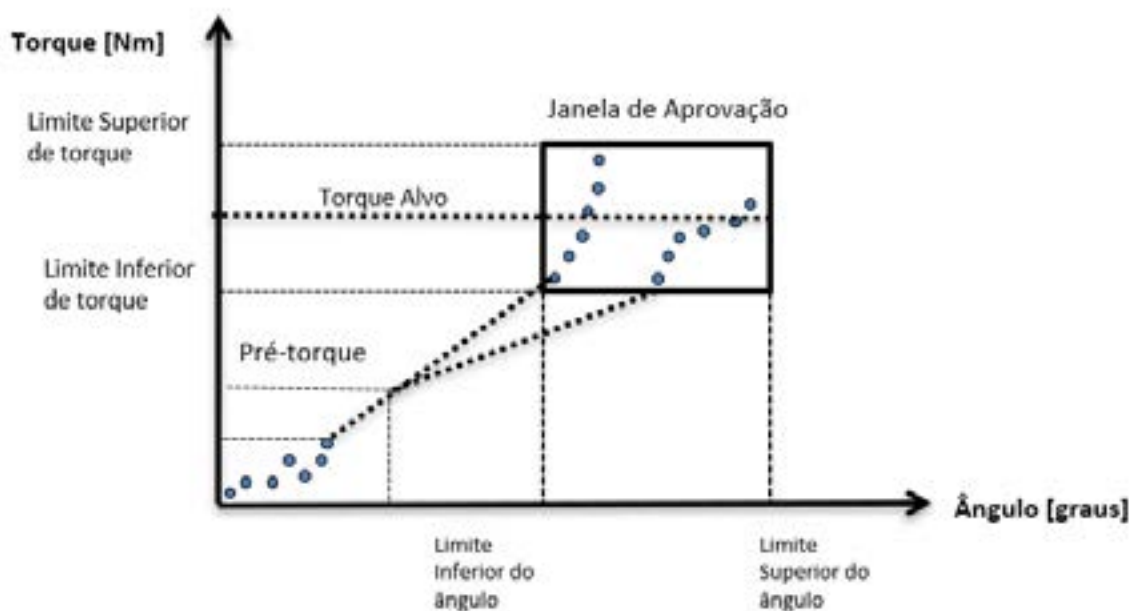
Através da Norma DIN 946 se tem um melhor detalhamento dos aspectos mais relevantes do “Kfactor”, além das propriedades geométricas do parafuso, mostradas nas equações 1 e 2, e de forma aperfeiçoada na equação 3, levando em consideração os parâmetros dimensionais do parafuso e principalmente os coeficientes de atrito, se tem a “equação aperfeiçoada” do momento de aperto. [5] E suas variáveis listadas na tabela 1.

$$M_A = \frac{\alpha}{360^\circ} * p * \frac{1}{\partial_s + \partial_p} * (0,159 * p + 0,578 * d_2 * \mu_G + \frac{DKm}{2} * \mu_k) \quad (3)$$

Tabela 1: Variáveis do processo de aperto

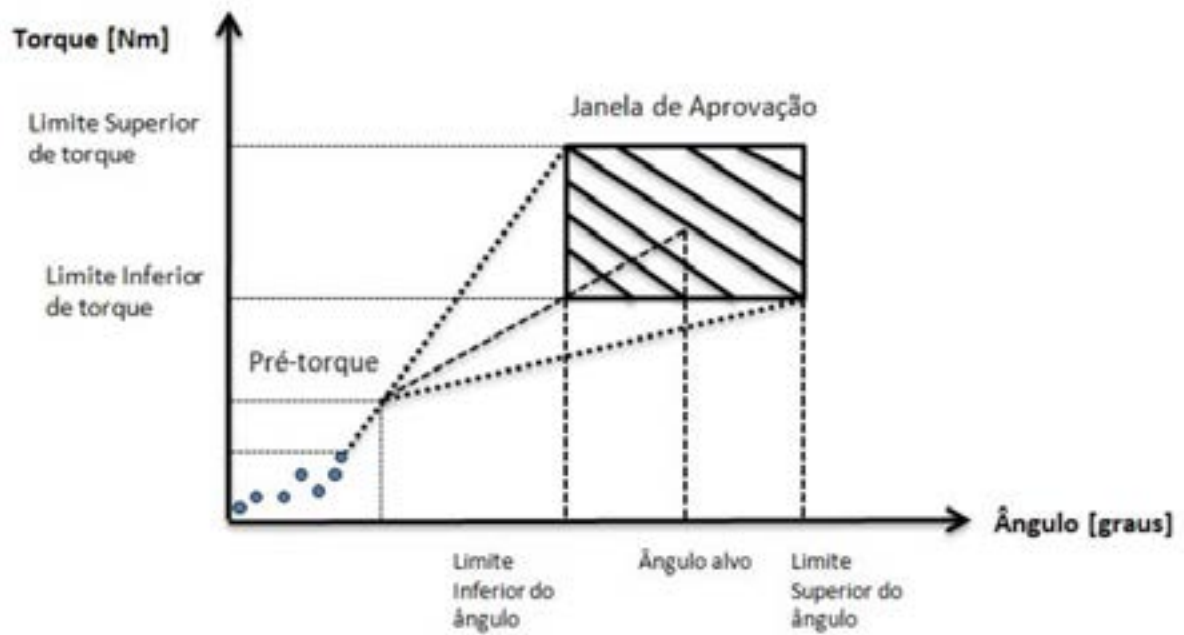
Variável	Descrição	Unidade
D	Diâmetro do parafuso	N.m.
K	Fator de torque (“K _{factor} ”)	Adm
α	Ângulo de deslocamento	Graus
δ_p	Resiliência do parafuso	mm/N
δ_s	Resiliência da junta	mm/N
P	Passo	N.m.
d_2	Diâmetro interno	N.m.
μ_G	Coefficiente de atrito de rosca	Adm
μ_k	Coefficiente de atrito de cabeça	Adm
D_{Km}	Diâmetro médio (assentamento)	Mm
M_A	Momento de aperto	N.m.
F_v	Força tensora	kN

Considerando um aperto por torque e monitoramento de ângulo de deslocamento, o mesmo é dividido em duas etapas. Na figura 2 podemos notar que se delimita uma janela de aprovação de ângulo de aperto. Além do limite inferior e superior de torque, porém dentro desse processo encontramos uma dispersão de valores de força de união gerada, em função da dispersão do ângulo. [5]

Figura 2: Representação do aperto por torque e monitoramento de ângulo

Fonte: Elaborado pelos autores

O processo de aperto por torque e ângulo de deslocamento também é dividido em duas etapas. Na figura 3, podemos observar a primeira fase desse processo denomina-se pré-torque, que depende fundamentalmente dos coeficientes de atrito, a qual garante um bom assentamento e uma força tensora parcial inferior a exigida em projeto. A segunda etapa é a fase angular, que independe do atrito, só do parafuso, e que irá adicionar uma força tensora devido ao ângulo de deslocamento, que nos irá garantir uma força de união constante e independentemente das variações encontradas durante o processo de aperto, eliminando a possibilidade de torque falso, fornecendo estabilidade ao processo e tornando o torque como uma variável resultante da estratégia, sendo o torque nesse processo de aperto a quantidade de energia necessária para gerar uma determinada força de união constante. [5]

Figura 3: Processo de aperto: Torque e ângulo de deslocamento

Fonte: Elaborado pelos autores

2. MATERIAIS E METODOLOGIA

2.1. MATERIAIS

- Atual de Produção: Parafuso Sextavado M16 × 2,0 × 40 mm, classe de resistência 10.9, com revestimento fosfatizado, com adesivo microencapsulado na sua rosca, que é utilizado na fixação da coroa do diferencial de um trator agrícola;
- Proposta: Parafuso sextavado M16 x 2,0 x 40 mm, classe de resistência 10.9, fosfatizado a frio e selante orgânico nanométrico;

Figura 4: Parafusos avaliados: atual de produção (lado esquerdo) e proposto (lado direito)

Fonte: Elaborado pelos autores

2.2 METODOLOGIA

“Procedimento numérico-computacional e experimental com o auxílio nas análises das propriedades e processos de aperto de elementos de fixação”.

Para a realização adequada do experimento e permitir a comparação das propriedades entre os fixadores, além de garantir a qualidade e uniformidade dos apertos realizados nas duas coroas do diferencial foram definidas as mesmas sequências de aperto para os dois parafusos: atual de produção e a proposto. Foram segmentados os apertos 3 a 3, no formato de triângulos no sentido horário, podem ser observadas na figura 7 do ANEXO I, para garantir o correto assentamento da junta, para evitar a falta ou excesso de torque aplicado nos parafusos durante esse experimento. Estratégia essa, que é adotada nas linhas de produção de manufatura para evitar problemas de assentamento em juntas rígidas, garantindo a padronização dos apertos realizados.

2. RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Foram realizados os apertos comparando os dois parafusos com e sem adesivo. Para o parafuso microencapsulado, foi adotada a estratégia atual da linha de produção na montagem da coroa do diferencial de tratores agrícolas por meio da aplicação de torque alvo – TA (280 N.m.) com uma janela de aprovação de ângulo de aperto. O parafuso proposto foi utilizada a estratégia de aperto por pré-torque e ângulo de deslocamento (80 N.m. + 40 graus), apresentando uma dispersão do valor de torque, porque agora essa variável se comporta como uma resultante – TR, podendo esse valor variar conforme o necessário para se atingir uma força de união constante, representada pelo ângulo de aperto. Os resultados comparativos entre os parafusos com e sem adesivo microencapsulado mostram a dispersão dos valores encontrados de força através da dispersão dos valores do ângulo, podem ser observados na tabela 4, do ANEXO II.

Na tabela 3, temos um sumário da análise estatísticas dos valores de torque, quer seja torque alvo ou torque resultante, bem como dos ângulos de aperto.

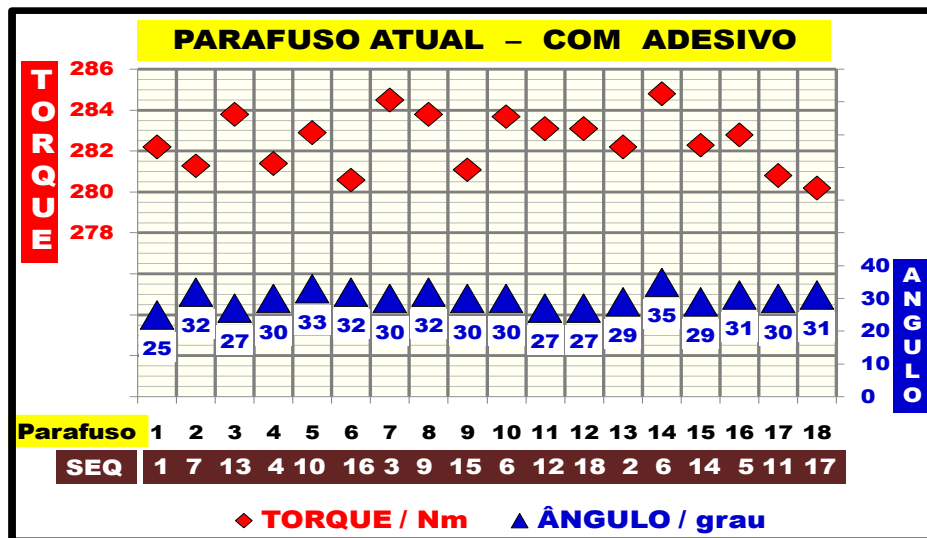
Tabela 3: Análise Estatística, comparativa entre os parafusos.

	Adesivo		Proposto	
	Torque	Ângulo	Torque	Ângulo
Máximo	284,8 N.m.	35°	263,1 N.m.	40°
Mínimo	280,2 N.m.	25°	241,1 N.m.	40°
Média	282,47 N.m.	30°	251,48 N.m.	40°
Desvio Padrão	1,32	2,38	5,41	0
Mediana	282,55 N.m.	30°	250,85 N.m.	40°
Moda	282,2 N.m.	30°	-	40°
Número Moda	2	5	0	18
Amostragem	18	18	18	18

Graficamente, o comportamento dos apertos realizados nos parafusos com e sem adesivo podem ser analisados nas figuras 5 e 6. Para o parafuso com adesivo, o comportamento variável do coeficiente de atrito durante o processo de aperto afeta negativamente a relação torque e força tensora gerada, porque não garante uma união uniforme. Durante o aperto, a maior parte do torque é dissipada para superar o atrito de rosca e de cabeça do parafuso, e apenas uma pequena parcela é usada para gerar força de aperto. O restante do torque é empregado para superar a força de atrito entre as roscas e disperso na forma de calor. As condições das superfícies nas interfaces roscadas juntamente com o adesivo microencapsulado, fazem com que o coeficiente de atrito de rosca seja elevado e variável. Isso somado a estratégia de torque alvo sem o controle do ângulo de aperto gere uma dispersão de força, para superar o atrito do parafuso, gerando um ângulo de aperto variável. Essas condições resultam em um baixo rendimento na sua utilização, gerando um comportamento de

uma classe de resistência inferior à especificada, perdendo propriedades fundamentais e prejudicando a integridade da junta. [6] – [7]

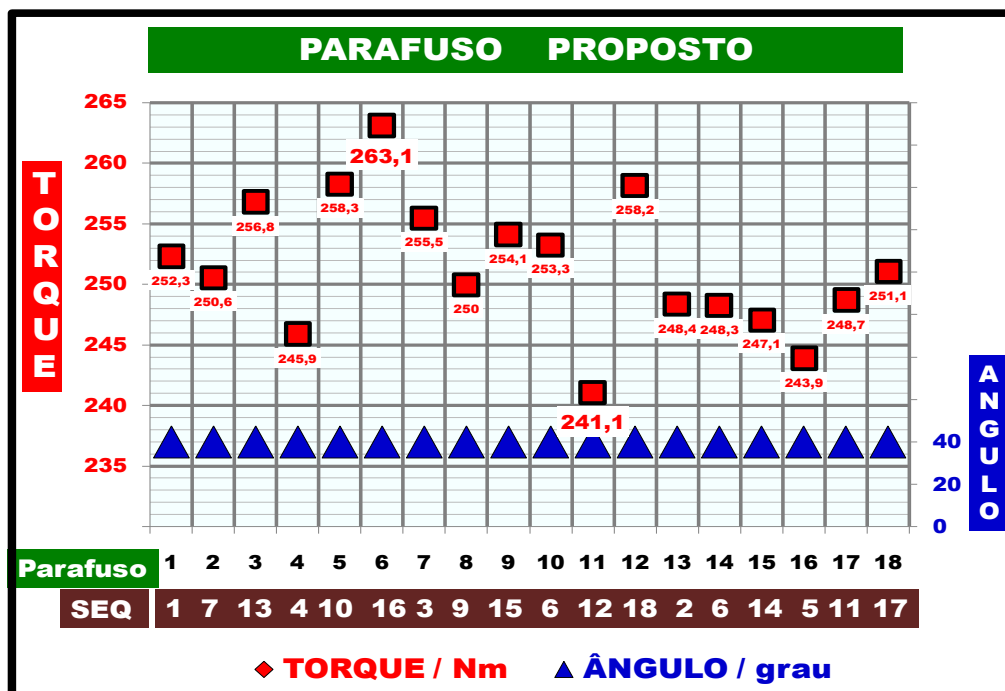
Figura 5: Dispersão de torque e ângulo do parafuso atual de produção



Fonte: Elaborado pelos autores

Enquanto no parafuso proposto, verifica-se um maior controle do coeficiente de atrito, e consequentemente uma diminuição da energia necessária para gerar a mesma força de união. Além de possibilitar o reaperto, que pode ser realizado sem a substituição do parafuso, e ainda possui uma resistência à corrosão maior e gera uma maior força de união com um menor torque resultante. Observa-se uma uniformidade nos valores de ângulo de aperto, resultando em uma força constante de união gerada pelos parafusos. Para esse parafuso, pode-se observar que o torque resultante é variável entre os apertos realizados apresentando uma dispersão entre suas amostras, pois é a energia que foi necessária para gerar a mesma força de união. [4] – [5] – [7]

Figura 6: Dispersão de torque e ângulo do parafuso proposto



Fonte: Elaborado pelos autores

3. CONCLUSÕES

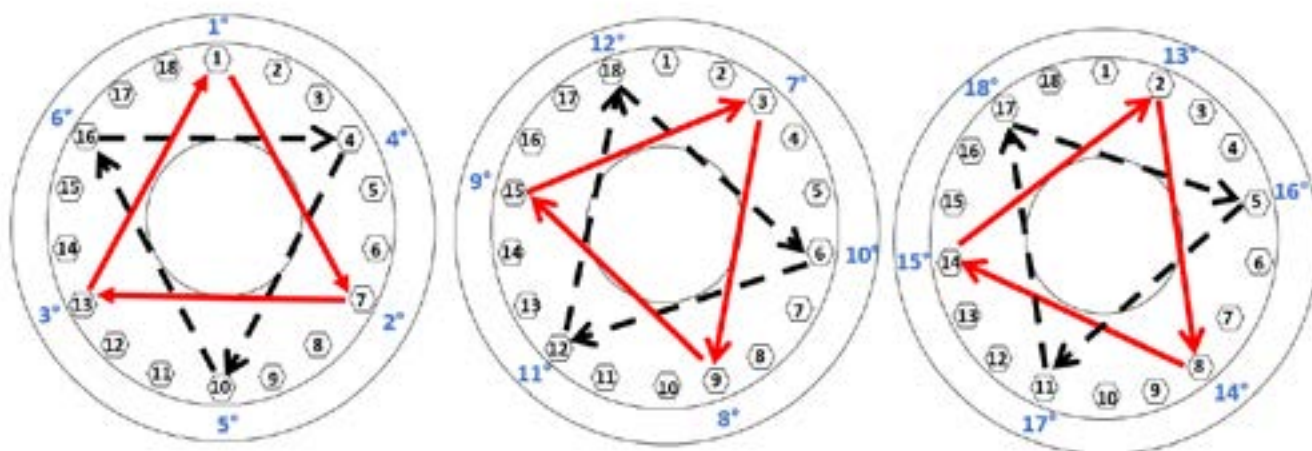
A definição da estratégia de aperto, somada a correta escolha das propriedades adequadas de revestimento, evita a soltura e as propriedades dos parafusos, reduz a energia necessária a ser aplicada, gerando uma maior força de união, por meio da utilização de um parafuso que apresenta coeficiente de atrito uniforme em sua superfície, melhorando a eficiência e aproveitamento das propriedades mecânicas do parafuso. A baixa dispersão dos valores de ângulo de aperto na estratégia de pré-torque e ângulo, com janela de torque resultante, aumentando a eficiência do aperto definido um processo robusto, podendo assim eliminar a utilização (desnecessária) de meios auxiliares da utilização de adesivos microencapsulados. A alteração para o parafuso proposto apresenta uma redução de custo do próprio elemento de fixação e da ferramenta de aperto, pois será possível utilizar uma máquina com menor capacidade.

4. REFERÊNCIAS

- [1] HAO, G. O. N. G.; JIANHUA, L. I. U.; HUIHUA, F. E. N. G. Review on anti-loosening methods for threaded fasteners. *Chinese Journal of Aeronautics*, v. 35, n. 2, p. 47-61, 2022.
- [2] “Rosqueamento Seguro”. *Revista do Parafuso*, 2007. Disponível em: <<http://www.revistadoparafuso.com.br/v1/modelo/noticia.php?id=280>>. Acesso em: março de 2023.
- [3] MAGGIORE, Sofia et al. A review of structural adhesive joints in hybrid joining processes. *Polymers*, v. 13, n. 22, p. 3961, 2021.
- [4] VDI 2230 - Verein Deutscher Ingenieure — Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen Zylindrische Einschraubenverbindungen, 2003
- [5] GARCIA, R. “Conceitos Gerais sobre Torque e Processos de Torque, Conceitos Relevantes sobre Coeficiente de Atrito”. 2011.
- [6] MASCENIK, Jozef; CORANIC, Tomas. Experimental Determination of the Coefficient of Friction on a Screw Joint. *Applied Sciences*, v. 12, n. 23, p. 11987, 2022.
- [7] LIU, Zhifeng et al. Changing behavior of friction coefficient for high strength bolts during repeated tightening. *Tribology International*, v. 151, p. 106486, 2020.

ANEXO I

Figura 7: Sequência de aperto realizada



Fonte: Elaborado pelo autor

ANEXO II

Tabela 4: Resultados comparativos de torque [N.m.] e ângulo [graus] entre os parafusos

SEQ	Amostra	Parafuso	Torque	Ângulo	SEQ	Amostra	Parafuso	Torque	Ângulo
1	1	Adesivo	282,2	25	1	1	Proposto	252,3	40
7	2	Adesivo	281,3	32	7	2	Proposto	250,6	40
13	3	Adesivo	283,8	27	13	3	Proposto	256,8	40
4	4	Adesivo	281,4	30	4	4	Proposto	245,9	40
10	5	Adesivo	282,9	33	10	5	Proposto	258,3	40
16	6	Adesivo	280,6	32	16	6	Proposto	263,1	40
3	7	Adesivo	284,5	30	3	7	Proposto	255,5	40
9	8	Adesivo	283,8	32	9	8	Proposto	250	40
15	9	Adesivo	281,1	30	15	9	Proposto	254,1	40
6	10	Adesivo	283,7	30	6	10	Proposto	253,3	40
12	11	Adesivo	283,1	27	12	11	Proposto	241,1	40
18	12	Adesivo	283,1	27	18	12	Proposto	258,2	40
2	13	Adesivo	282,2	29	2	13	Proposto	248,4	40
8	14	Adesivo	284,8	35	8	14	Proposto	248,3	40
14	15	Adesivo	282,3	29	14	15	Proposto	247,1	40
5	16	Adesivo	282,8	31	5	16	Proposto	243,9	40
11	17	Adesivo	280,8	30	11	17	Proposto	248,7	40
17	18	Adesivo	280,2	31	17	18	Proposto	251,1	40



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil

26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis

12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

Influência da temperatura de conformação na resistência à corrosão de ligas de Magnésio com terras raras - uma revisão

G. V. H. Carlan ⁽¹⁾

E. L. Schneider ⁽²⁾

L. C. Scienza ⁽³⁾

J. M. Vassoler ⁽⁴⁾

D. T. Almeida ⁽⁵⁾

RESUMO

Ligas de magnésio enfrentam desafios relacionados à corrosão em ambientes agressivos e à limitada conformabilidade industrial em temperatura ambiente devido à estrutura hexagonal compacta do magnésio que lhe confere baixa ductilidade. Neste contexto, a adição estratégica de terras raras como Nd, Gd, Ce e La permite a formação de precipitados que proporcionam estabilidade térmica e restrição do crescimento de grão durante a conformação a morno e à quente. A presente revisão aborda os resultados de diversos estudos publicados referentes ao efeito da composição química, precipitados formados, encruamento e temperatura de conformação na resistência a corrosão de ligas de magnésio com terras raras.

Alguns resultados encontrados na literatura, destacam que ao considerar a temperatura de conformação a morno constante, a 250°C, deformações entre 30% e 50% reduzem significativamente a taxa de corrosão na liga AZ31 em comparação com deformações de 10% a 20%, relacionando isso aos diferentes estágios de deformação, nos quais o estágio inicial tem maior impacto visto ser de endurecimento por deformação. E que isso pode ser atribuído à recristalização dinâmica pela elevação da temperatura, onde novos grãos se formam a partir da reorganização dos átomos, formando uma estrutura cristalina regular e são mais homogêneos do que os grãos deformados, logo, tornando o material menos suscetível à corrosão.

Os estudos realizados concluíram que a adição de RE restringe o crescimento dos grãos e ativa mais planos de escorregamentos durante a deformação a morno e a quente, reduzindo o endurecimento por deformação e refina os grãos, tornando as ligas mais conformáveis e, ao mesmo tempo, mais resistentes à corrosão, o que é benéfico para diversas aplicações industriais.

Palavras chaves — Ligas de magnésio, terras raras, corrosão, conformabilidade, crescimento de grãos, recristalização dinâmica.

ABSTRACT

Magnesium alloys face challenges related to corrosion in aggressive environments and limited room temperature formability due to the hexagonal close-packed structure of magnesium, which imparts low ductility. In this context, the strategic addition of rare earth elements such as Nd, Gd, Ce, and La allows the formation of precipitates that provide thermal stability and grain growth restriction during warm and hot forming processes. This review discusses the findings of various published studies regarding the effect of

chemical composition, formed precipitates, work hardening, and forming temperature on the corrosion resistance of rare earth-containing magnesium alloys.

Some results found in the literature highlight that when considering a constant warm forming temperature of 250°C, deformations between 30% and 50% significantly reduce the corrosion rate in the AZ31 alloy compared to deformations of 10% to 20%. This is attributed to the different stages of deformation, where the initial stage has a greater impact due to strain hardening. This can be attributed to dynamic recrystallization due to the elevated temperature, where new grains form through atom reorganization, creating a regular crystalline structure that is more homogeneous than deformed grains, thus making the material less susceptible to corrosion.

The conducted studies have concluded that the addition of rare earth elements restricts grain growth, activates more slip planes during warm and hot deformation, reduces strain hardening, and refines the grains, making the alloys more formable while simultaneously enhancing their corrosion resistance. This is beneficial for a variety of industrial applications.

Keywords — Magnesium alloys, rare earth elements, corrosion, formability, grain growth, dynamic recrystallization.

(1) Guilherme Vilmar Herter Carlan; Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

(2) Prof. Dr. Eduardo Luis Schneider; Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

(3) Prof. Dra. Lisete Cristine Scienza; Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

(4) Prof. Dr. Jakson Vassole; Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

(5) Dr. Diego Tolloti De Almeida; Bruning Tecnometal, Brasil.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a redução no consumo de energia, aliada a diminuição das emissões de CO₂, de veículos de passageiros, e, de carga, são de suma importância para o meio ambiente e economia. Essa questão, tem atraído o interesse das indústrias, e, conseqüentemente, de pesquisadores acadêmicos, a desenvolverem materiais mais leves, que reduzam esse impacto ao meio ambiente, conservando as propriedades mecânicas desejadas.

Ligas leves como as de alumínio, de magnésio e titânio começaram a ser usadas em peças que anteriormente eram fabricadas apenas em aço, permitindo a diminuição do peso delas. Contudo, devido a características mecânicas, físicas, e, de custo, possuem restrições quanto ao uso em peças estruturais. Por exemplo, a aplicação das ligas de Mg, em especial laminadas, está muito aquém das ligas de alumínio, e, ocupam pouco espaço na indústria automotiva e aeroespacial. Os fatores limitantes, são, principalmente, a baixa ductilidade em temperatura ambiente (baixa conformabilidade), e, processos de redução de óxidos e sais de Mg ineficientes, em comparação ao processo Hall, usado para a obtenção do alumínio primário. Logo, o magnésio, possui maiores custos de processamento.

Entretanto, as ligas de Mg se enquadram nos mais leves e promissores materiais com uma baixa densidade, por volta de, 34% abaixo do alumínio e 72% abaixo do aço.

O Mg laminado, é um material altamente anisotrópico. Em razão da sua estrutura hexagonal compacta, que fornece apenas três sistemas de escorregamentos ativos, bem como do processamento prévio de laminação do Mg, que produz a formação de textura basal na estrutura do material. Sendo assim, o Mg, tende a romper experimentando pouca deformação plástica, quando deformado em temperaturas abaixo de 110 °C.

O magnésio é propenso à corrosão e segundo Song e Atrens [1], na maioria dos casos, a corrosão das ligas de magnésio inicia de forma localizada, mas às vezes a corrosão é superficial e generalizada, em função dos elementos químicos da liga e o ambiente em que a mesma será utilizada. Por exemplo, a corrosão atmosférica tende a ser uniforme em ambientes industriais (usuais), e, geralmente localizada para condições em que o material está submerso. Já Tunold [2] verificou que, a corrosão do magnésio de pureza comercial geralmente é intragranular (ocorre ao longo das fronteiras dos grãos dentro do material), enquanto a corrosão das ligas era mais uniforme (em toda a superfície do material). Da mesma forma, Makar e Kruger [3], relataram em seu estudo que tinha o borato de sódio como eletrólito e um tempo de ensaio de uma semana resultaram em diferentes níveis de corrosão, com o magnésio puro exibindo um ataque não uniforme e desintegração em partículas, enquanto as ligas mostraram corrosão mais uniforme relacionada às medições de espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS).

Por outro lado, Xiao et al. [4] observaram em seus estudos que a adição de elementos de terras raras no Mg é um fator que restringe o crescimento do grão quando o material é deformado à morno e à quente. O desempenho de conformabilidade de ligas contendo terras raras pode ser melhorado como resultado da ativação de mais planos de deslizamento, e a recristalização dinâmica (RD) que fornece uma maneira

eficaz de suavizar o endurecimento por deformação e refinamento de grãos durante a deformação à morno e à quente.

Sendo assim, este trabalho tem como objetivo geral fazer uma revisão bibliográfica sobre as influências da temperatura de conformação e quantidade de deformação na resistência à corrosão de ligas de magnésio com terras raras.

2. PERSPECTIVAS PROMISSORAS NAS LIGAS DE MAGNÉSIO COM TERRAS RARAS

2.1. Influência da composição química nas propriedades e resistência a corrosão

A partir dos estudos realizados por Gusieva et al. [5], é possível identificar que o magnésio (Mg), um metal altamente reativo com baixo potencial de eletrodo padrão, é suscetível à corrosão eletroquímica devido a reações exotérmicas com água e oxigênio, impulsionadas por sua alta energia de ionização e eletronegatividade. A introdução de elementos de terras raras (RE) nas ligas de magnésio marcou uma fase significativa no desenvolvimento desses materiais. A adição de elementos como neodímio, gadolínio, cério e lantânio tem demonstrado efeitos benéficos na melhoria das propriedades mecânicas e na resistência à corrosão [4] e [6]. Estudos realizados por Al-Salman e Li [7] trazem informações que auxiliam a compreender melhor o comportamento mecânico das ligas de Mg em comparação com o Mg puro, ambos testados em sua condição original de fabricação. Como pode ser observado na Tabela 1, o exemplo das ligas contendo RE apresentam uma resistência mecânica de até 40% superior à do Mg puro, juntamente com uma capacidade de deformação até a ruptura de até 3,5 vezes maior. Em comparação, essa série demonstra uma resistência mecânica 6% menor do que a liga convencional AZ31B, porém, compensada por uma capacidade de deformação até a ruptura 30% superior.

Tabela 1: Composição química e propriedades mecânicas de algumas ligas de magnésio.

Série de Liga	Zn (%)	Zr (%)	Ce (%)	La (%)	Nd (%)	Gd (%)	Pr (ppm)	Fe (ppm)	UTS (MPa)	ef (%)
Ce-series	0,68	0,18	0,78	-	-	-	-	27	232	18,84
La-series	0,89	0,22	-	0,69	-	-	-	9	241	24,41
Nd-series	0,61	0,27	-	-	0,58	-	-	26	237	28,02
Gd-series	0,73	0,24	-	-	-	0,73	-	9	229	30,34
MM-series	0,84	0,33	0,59	0,21	0,057	-	232	39	242	23,58
Pure Mg	-	-	-	-	-	-	-	-	170	8
AZ31B	-	-	-	-	-	-	-	-	~253	~19

Fonte: adaptado de [7].

Embora ligas de magnésio possam incluir Al, Zn, Mn e RE como Gd, a presença desses elementos muitas vezes resulta em compostos de RE que possuem potenciais eletroquímicos mais baixos. Isso proporciona reações de corrosão mais fracas com a matriz de magnésio, o que, no entanto, não elimina completamente os desafios de corrosão, pois as camadas de óxido frequentemente formadas nessas ligas podem ser insuficientes para passivar a superfície. Ou seja, embora as ligas de Mg-RE possuam vantagens como resistência a altas temperaturas e a capacidade de terem sua resistência mecânica aumentada por solução sólida, sua resistência à corrosão varia significativamente de acordo com os elementos de liga e suas estruturas.

O estudo realizado por Meng et al. [8] investigou os efeitos das fases intermetálicas nas ligas de magnésio com RE na resistência à corrosão. A partir da Tabela 2, pode-se verificar que diferentes fases formadas com RE demonstraram diferentes polarizações e correntes de corrosão.

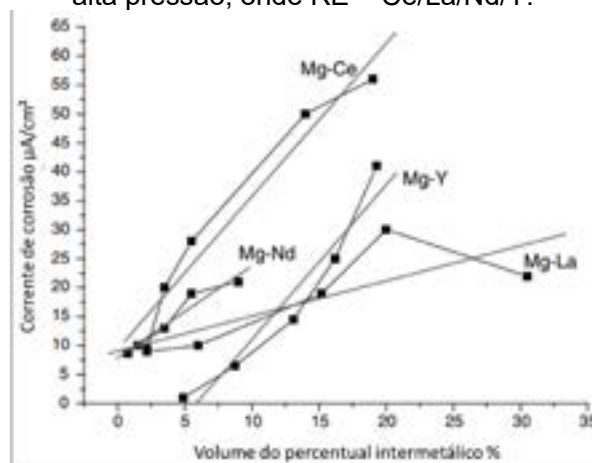
Tabela 2: Parâmetros eletroquímicos das fases catódicas Mg-RE.

Composto	Potencial de Corrosão (V)	Diferença de Potencial vs. Matriz (mV)	Densidade de Corrente ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Resistência à Polarização (Ωcm^2)
Mg	-1,645	0	-	-
Mg ₁₂ La	-1,600	45	69,7	646
Mg ₁₂ Ce	-1,500	145	273	531
Mg ₃ Nd	-1,570	75	166	452
Mg ₁₂ Y ₅	-1,610	35	251	139

Fonte: Adaptado de [8].

O potencial de corrosão e a densidade de corrente de todos os compostos com RE é maior quando se considera uma relação com o Mg puro. Contudo, quando analisamos a influência da adição de outros elementos, a resistência a corrosão é menor com o aumento da proporção de compostos intermetálicos de Mg com RE de acordo com o gráfico da Figura 1, justamente porque os precipitados formados tendem a aumentar a densidade de corrosão da liga gerando uma corrosão galvânica interna.

Figura 1: Percentual de Volume Intermetálicos vs Taxa de Corrosão, para ligas de Mg-RE fundidas sob alta pressão, onde RE = Ce/La/Nd/Y.



Fonte: Adaptado de [8].

Os elementos RE, incluindo o Nd, Y, La, entre outros, têm propriedades químicas semelhantes e podem influenciar efetivamente as propriedades das ligas resultando em compostos intermetálicos de alto ponto de fusão e propriedades mecânicas e resistência à corrosão aprimoradas. No que tange a corrosão, alguns compostos Mg-RE tem menor resistência do que outros, como é o caso do composto $Mg_{12}Y_5$, que apresentou menor resistência à polarização (em um meio de 5% de NaCl) mesmo sem uma grande diferença de potencial em relação à matriz como pode ser visualizado na Tabela 2, assim como alta taxa de corrosão como é o caso da liga Mg-6Gd-3Y-0,4Zr, e na Tabela 3, respectivamente.

Tabela 3: Taxa de corrosão de ligas de alumínio e magnésio com diferentes teores de RE e/ou outros elementos.

Liga	Taxa de corrosão por perda de peso (g/m ² h)	Profundidade anual de corrosão (mm/a)	Profundidade máxima da corrosão por pites (mm)	Imersão em 5% NaCl por 3 dias
AZ91	2,14	10,3	0,406	-
AZ91 + 0.5Ce	0,16	0,77	0,241	-
AZ91 + 0.5Nd	0,17	0,82	0,327	-
Mg-3Nd-0.2Zn-0.4Zr	0,085	0,35	-	X
Mg-3Nd-0.2Zn	0,56	2,4	-	X
Mg-6Gd-3Y-0.4Zr	5,5	21,9	-	X
Mg-8Gd-3Y-0.4Zr	8,2	30,8	-	X

Fonte: Adaptado de [8].

A presença dessas fases intermetálicas influenciou significativamente a eficiência da evolução do hidrogênio, indicando maior sensibilidade à corrosão. Logo, a resistência à corrosão das ligas de magnésio pode ser melhorada pelo controle das fases intermetálicas presentes na matriz da liga.

A formação de compostos é outro elemento chave [5] e [9]. Estudos realizados por Gusieva et al. [5] certificaram que compostos de RE, como $Mg_{12}Ce$ e $Mg_{12}La$, têm um papel significativo na taxa de corrosão. Quando o Ce é adicionado, pode ocorrer a formação da fase $Mg_{12}Ce$, que aumenta com o aumento da quantidade de Ce e acelera a corrosão, melhorando as reações catódicas. Além disso, em ligas que também contêm Al, a adição de Ce pode formar intermetálicos como Al_4Ce ou $Al_{11}Ce_3$, que são mais prejudiciais à corrosão. A combinação de RE e Al em ligas de Mg modernas não é comum devido à formação de compostos Al_xRE_y , que reduzem a ductilidade da liga. A influência do Ce na formação de filmes de superfície e estabilização do hidróxido de Mg é incerta, e a modificação do óxido em ligas de Mg permanece uma questão em aberto. Em geral, os elementos com capacidade termodinâmica para substituir os óxidos/hidróxidos de Mg não costumam oferecer uma proteção à corrosão melhor do que o Mg puro. A fase Mg_3Nd atua como um cátodo mais eficiente do que o Mg puro, resultando em uma aceleração contínua da cinética catódica e, portanto, taxas de corrosão mais elevadas com o aumento do teor de Nd. É observado que o aumento na corrosão devido ao Nd é menor do que o observado com Ce. O Mg_3Nd contém uma porcentagem atômica mais elevada de RE do que as fases $Mg_{12}Ce$. Do ponto de vista da corrosão, Nd é considerado o elemento RE mais adequado, embora também seja o mais caro e, portanto, frequentemente apresente concentrações limitadas. Em ligas AZ e AM, o Nd forma uma fase Al-Nd, além de substituir a fase Al-Mn por um composto intermetálico Al-Mn-Nd. O Nd melhora a resistência à corrosão das ligas de Mg-Al, minimizando o efeito de acoplamento galvânico presente em ligas AZ ou AM sem Nd. Além disso, o Nd é relatado como possível contribuinte para a formação de um filme de óxido superficial

protetor composto de Mg e RE.

A influência da composição e distribuição de fases também é crucial, sendo que o processo de fundição e tratamento térmico desempenham papéis essenciais na distribuição das fases RE, moldando a morfologia das fases e, conseqüentemente, afetando a capacidade anticorrosiva da liga. A formação de fases precipitadas e microestruturas refinadas contribui para a melhoria das propriedades mecânicas e anticorrosivas [8], [10].

O aprimoramento da resistência à corrosão das ligas de magnésio pode ser viabilizado por meio do controle estratégico de elementos como Mn, Nd e Zr. Conforme estudos realizados por Gusieva et al. [5], a adição de Mn em ligas binárias de Mg-Mn reduz a taxa de corrosão, o que é promissor para aplicações práticas. Além disso, foi observado que o Mn pode “encapsular” o Fe em ligas de Mg sem Al, sugerindo que o Mn pode ser eficaz na sequestração de Fe mesmo na ausência de Al, Dieringa et al. [11] também citam que o Mn é usado para melhorar a conformabilidade das ligas e tende a formar compostos intermetálicos inofensivos com impurezas como Fe, Ni ou Cu, que originalmente aumentam a corrosão. Considerando o Nd, a formação da fase Mg₃Nd em ligas de Mg-Nd, que atua como um cátodo, acelerando a cinética de corrosão com o aumento do teor de Nd na liga. No entanto, essa aceleração é menor do que a observada com RE, como Ce e La. O Nd é considerado o mais adequado dos Res em termos de corrosão, mas também é o mais caro e, portanto, geralmente limitado em sua concentração. O Zr é adicionado às ligas de Mg para refinar os grãos e melhorar suas propriedades mecânicas em especial em conjunto com Zn e RE, Jiang et al. [6] e Dieringa et al. [11] citam que RE são usados para formar precipitados que levam a melhorias nas propriedades mecânicas. Segundo Gusieva et al. [5], o Zr tem baixa solubilidade em Mg e pode acelerar a corrosão, tornando-a mais rápida do que em ligas de Mg-Al. também observa que alguns estudos sugerem que o tratamento térmico e a adição controlada de Zr (~0,42% pp.) podem melhorar a resistência à corrosão, mas a influência do Zr na corrosão é complexa, muitas vezes negativa. Em ligas com diferentes elementos, sua influência é difícil de determinar devido à presença de outros elementos. Além disso, o Zr não é adicionado a ligas de Mg-Al devido à formação da fase intermetálica Al₃Zr que anula o efeito do refinamento do grão. O mecanismo de corrosão da liga ZE41 é descrito como um ataque localizado nas regiões próximas à fase intermetálica Mg₇Zn₃RE, seguido por um ataque profundo nas regiões ricas em Zr. Geralmente, o Zr é adicionado a ligas que também contêm Zn e RE, como as ligas das séries ZE e ZK. Quando se explora a melhora da estabilidade térmica do magnésio, a inclusão de elementos como Zn, Zr e Nd emerge como uma estratégia eficaz. Em particular, o Nd exibe a capacidade de inibir a recristalização e o crescimento de grãos, resultando em maior estabilidade em condições de alta temperatura. Esse atributo é de extrema importância para aplicações sujeitas a maiores temperaturas de trabalho [4] e [5].

2.2. Mecanismos de corrosão e crescimento de grãos em ligas de magnésio com terras raras

No âmbito das propriedades mecânicas, estudos documentados na literatura [6], [12], [13] e [14] explicam que à medida que o tamanho de grão do magnésio aumenta, suas propriedades mecânicas, como resistência e ductilidade, diminuem. Tal fenômeno é explicado pela presença de contornos de grão, que funcionam como obstáculos ao movimento das discordâncias no material. Com o aumento do tamanho dos grãos, a resistência à deformação plástica é reduzida.

Estudos realizados por Shrestha et al. [15] e Ralston et al. [16] respaldam a ideia de que a redução do tamanho de grão proporciona aumento na resistência à corrosão pois têm a capacidade de formar camadas passivas protetoras em muitos ambientes, contudo, elas podem enfrentar desafios em ambientes altamente ácidos, com íons cloreto ou em altas temperaturas, gerando um efeito contrário. Por certo, as fronteiras dos grãos têm propriedades distintas em relação ao material em massa, em termos de coordenação atômica, reatividade e taxas de difusão. Conseqüentemente, é de se esperar que superfícies com densidades de contornos de grãos relativamente altas exibam comportamento eletroquímico diferente (ou seja, taxas de corrosão) em comparação com superfícies de grãos mais grossos com densidades de contornos de grãos mais baixas. Se um material tem uma alta densidade de contornos de grãos, significa que há muitos locais onde os grãos se encontram na superfície. Essas áreas podem agir como pontos de nucleação para a formação do filme de óxido, acelerando assim o processo de passivação (formação do filme de óxido), aumentando resistência a corrosão. Além disso, os contornos de grãos também podem facilitar a condução de elétrons através do filme de óxido, tornando-o mais eficaz na proteção contra a corrosão. Contudo, pode ter o efeito contrário caso não haja formação de camada passiva. Um estudo adicional, conduzido por Argade et al. [17], destacou que uma liga Mg-Y-RE de granulação ultrafina apresentou taxas de corrosão quase quatro vezes inferiores às de uma liga com granulação mais grossa, como evidenciado em testes de imersão em solução salina (3,5% NaCl). Além disso, Makar e Kruger [3], compararam a passividade das ligas de magnésio com outros tipos de metais, bem como estudos de polarização anódica em diferentes soluções contendo íons cloreto. Os resultados mostram que a liga de magnésio AZ61 “rapidamente solidificada” exibe uma resistência à corrosão melhorada em comparação

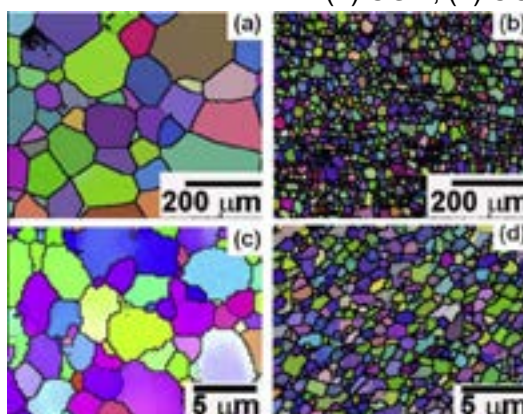
com a liga de magnésio AZ61 “fundida”. Isso sugere que a microestrutura fina e homogênea da liga rapidamente solidificada pode ter um efeito benéfico na formação e estabilidade de filmes passivos que protegem a superfície da corrosão. O que é comprovado nos estudos realizados por Argade et al. [17] e pode ser observado na Figura 2 e Tabela 4 onde inicialmente, as amostras como recebidas foram submetidas a um tratamento térmico a 520 °C por 4 horas para obter um tamanho de grão mais grosseiro. Em seguida, o processamento por *friction stir processing* – FSP, foi utilizado para obter microestruturas de grão mais fino. O FSP foi realizado em várias etapas, com parâmetros de velocidade e rotação específicos. As amostras foram designadas de acordo com os tratamentos aplicados: CG 1 para o tratamento térmico, CG 2 para como recebido sem tratamento adicional, FG para uma passagem de FSP e UFG para duas passagens de FSP.

Tabela 4: Parâmetros Eletroquímicos e Estabilidade da Camada Passiva em Diferentes Tamanhos de Grão da Liga Mg-4Y-3Nd.

Condição	Potencial de rompimento da camada de passivação (Eb) (mV vs. SCE)	Potencial de repassivação (Ep) (mV vs. SCE)	Eb-Ecorr (mV)	Eb-Ep (mV)
CG 1	-1589 ± 22	-	138 ± 32	-
CG 2	-1591 ± 30	-1754 ± 28	192 ± 35	173 ± 25
FG	-1617 ± 18	-1710 ± 24	177 ± 29	83 ± 19
UFG	-1597 ± 25	-1658 ± 30	160 ± 38	61 ± 28

Fonte: Adaptado de [17].

Figura 2: Microscopia eletrônica de varredura (a) CG 1, (b) CG 2, (c) FG e (d) UFG.



Fonte: Adaptado de [17].

Como pode ser visualizado na Figura 2 e Tabela 4, e considerando que o ambiente onde foi realizado o estudo é 3,5 %pp NaCl, a redução do tamanho de grão torna o material mais resistente a corrosão, visto que a diferença entre Eb-Ep é menor para tamanhos de grãos menores, nota-se que UFG é ~20% menor que FG, e ~130% menor que CG2. Ou seja o material permanece menos polarizado em direção à corrosão após a formação da camada protetora.

Foi observado que a liga ZE10A em diferentes eletrólitos como Na₂SO₄ 0,5M, NaCl 0,6M e NaNO₃ 0.1M, que a taxa de corrosão aumenta com o aumento do tamanho de grão e o efeito desse é mais bem observado na solução NaNO₃ 0.1M, e como é sabido o magnésio de pureza comercial apresenta as menores taxas de corrosão visto a menor tendência à formação de pares galvânicos [15].

No entanto, a compreensão dos complexos mecanismos de corrosão nessas ligas é crucial para o desenvolvimento de aplicações mais duráveis, por exemplo, a corrosão galvânica emerge como um mecanismo de deterioração nessas ligas [1], [18] e [19]. A variação nos potenciais de eletrodo nas fronteiras de fases é um fator crítico, onde os elementos de terras raras atuam como cátodos e ânodos em diferentes regiões. Os cátodos podem ser externos, como outros metais em contato com o magnésio, ou podem ser internos, como fases secundárias ou de impureza. Ou seja, é um processo eletroquímico complexo que pode desencadear a degradação das ligas.

Outro mecanismo proeminente é a corrosão localizada, influenciada pela densidade de corrente nas diferentes fases [1] e [20]. As fases ricas em RE exibem diferentes densidades de corrente, o que impacta diretamente a resistência à corrosão. A morfologia da fase rica em RE também desempenha um papel crucial; fases fragmentadas oferecem melhor proteção, enquanto fases contínuas podem ser mais suscetíveis à corrosão seletiva em regiões específicas.

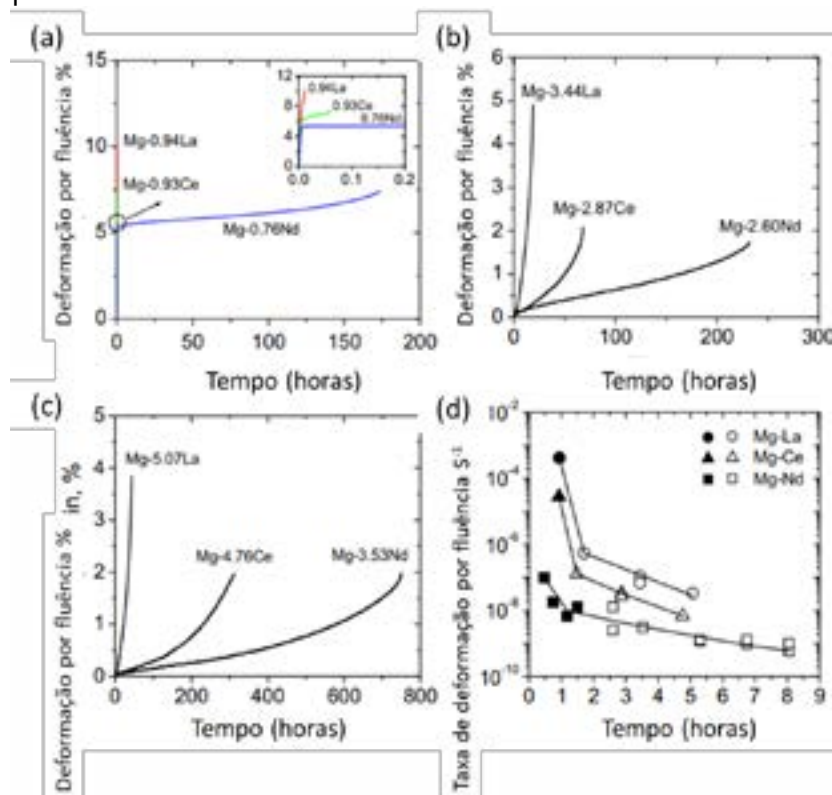
2.3. Influência do encruamento e temperatura de conformação na resistência a corrosão de ligas de magnésio com terras raras

A incorporação de elementos como Zn em conjunto com Zr e RE demonstra a capacidade de promover endurecimento por precipitação nas ligas de magnésio, resultando em um aprimoramento significativo da resistência mecânica e da dureza. Essa transformação se traduz em uma adequação notável para aplicações que demandam alta resistência [6], [14], [17] e [21].

De acordo com os estudos conduzidos por [22], que envolveram ligas de Mg com diferentes níveis de RE (La, Ce, Nd) submetidas a testes de fluência a 177°C, observou-se que um aumento no teor RE resultou em uma maior resistência à fluência a 177°C. A liga de Mg-2,60Nd destacou-se como a mais resistente, com menos de 1% de deformação após 100 horas, enquanto a liga de Mg-3,44La falhou em cerca de 19 horas com uma deformação de 4,9%, e a liga de Mg-2,87Ce durou 68 horas com uma deformação de 2,1%. Estes resultados ilustram a influência significativa dos Res na resistência à fluência, como pode ser observado na Figura 3.

A microestrutura inicial das ligas consiste em dendritas de Mg- α na região central e eutético nas regiões interdendríticas. O aumento do teor de RE aumentou a quantidade de eutético e fase intermetálica nos contornos dos grãos. Análises de microscopia eletrônica mostraram que as ligas com mais RE tinham maior quantidade de soluto na matriz de Mg, sugerindo potencial para endurecimento por precipitação durante a fluência.

Figura 3: (a-c) Curvas de fluência de ligas selecionadas de Mg-RE a 177 °C e 90 Mpa, e (d) variação da taxa de fluência secundária com o teor de RE. Os símbolos sólidos em (d) representam situações em que o estresse aplicado durante a fluência está acima da resistência de escoamento de 0,2%.



Fonte: Adaptado de [22].

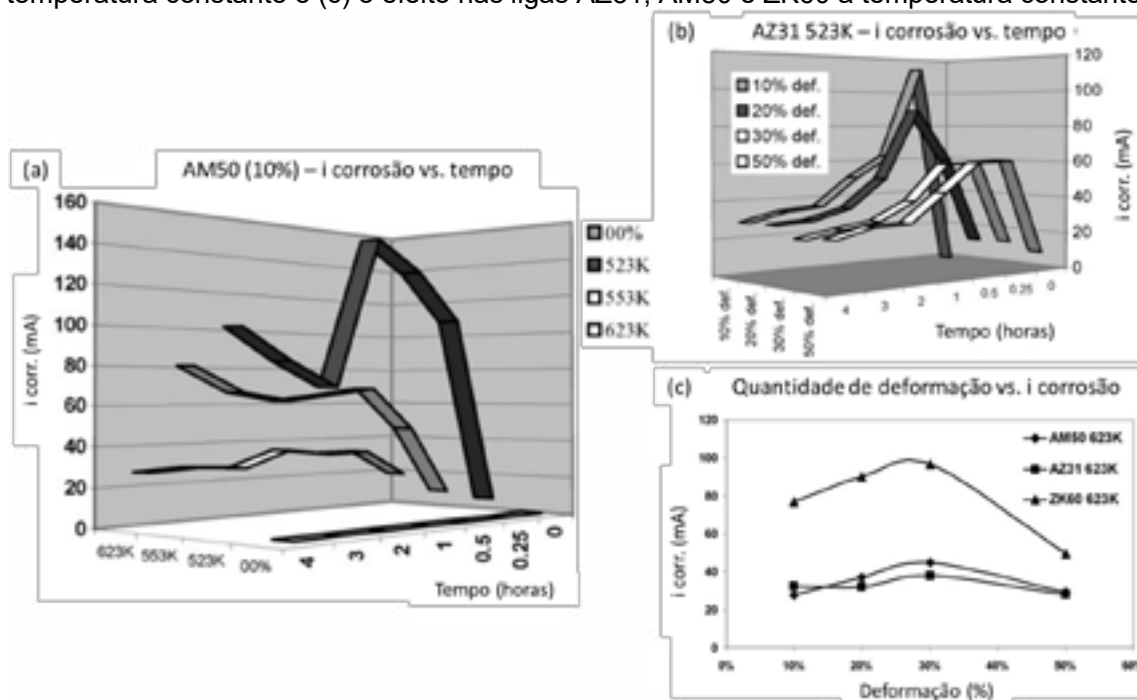
O estudo realizado por Snir et al. [22], investigou a influência da temperatura de conformação na resistência à corrosão de ligas comerciais de magnésio: AZ31, AM50 e ZK60. Deformações plásticas foram aplicadas a essas ligas em temperaturas de 250°C e 280°C, representando condições de trabalho à morno, e, 350°C, correspondendo condições de trabalho a quente para ligas de magnésio. O estudo avaliou as mudanças microestruturais, propriedades mecânicas e comportamento de corrosão das ligas. A análise microestrutural revelou que a deformação plástica em temperaturas mais baixas resultou na formação intensa de bandas de cisalhamento, indicando um acúmulo de energia mecânica. Além disso, a deformação plástica inicialmente levou a um aumento na microdureza, seguido de uma diminuição após um certo nível de deformação. Esse comportamento foi atribuído à RD, um processo em que os grãos deformados se reorganizam para aliviar as tensões. E que aumenta quanto maior o nível de deformação e tempo mantido na temperatura alta. Os contornos de maclas desempenharam um papel crucial na movimentação de discordâncias, as maclas atuam como barreiras de discordâncias, sendo mais

proeminentes em temperaturas mais baixas de deformação, e são elas que promovem a RD e quanto mais contornos maior a quantidade de RD.

A recristalização foi mais evidente em temperaturas mais altas e Snir et al. [22] observaram que as ligas AZ31 e ZK60 têm um comportamento distinto da liga AM50. A microdureza dessas ligas aumenta inicialmente com a deformação de 20-30%, mas depois diminui com 50% de deformação, especialmente em temperaturas 250°C e 280°C, condição de trabalho a morno. Em contraste, a microdureza da liga AM50 aumenta de forma constante nas temperaturas mais baixas e se assemelha ao comportamento das ligas AZ31 em temperaturas mais altas. Os autores também menciona que a liga ZK60 apresenta valores de microdureza mais altos do que as outras duas devido ao seu tamanho de grão menor e à presença de fases secundárias. Além disso, a liga AM50 tem valores de microdureza mais altos do que a liga AZ31 devido ao maior teor de Al na primeira liga, o que contribui para o fortalecimento por solução e por fases secundárias. Ou seja, o comportamento da microdureza dessas ligas varia com a temperatura, a deformação e a composição química das ligas. O “efeito mecanoquímico” indica uma relação entre deformação mecânica e taxa de corrosão, com maior corrosão em deformações mais baixas e maior resistência à corrosão em deformações mais altas [22].

A relação entre propriedades mecânicas e comportamento de corrosão foi destacada, com maior taxa de corrosão observada durante a fase de endurecimento por deformação como pode ser visto na Figura 4. A taxa de corrosão foi particularmente influenciada pela sensibilidade à deformação plástica, como é o caso da liga AZ31, conforme mostrado na Figura 4b. Deformações entre 30% e 50% resultam em uma taxa de corrosão que é apenas a metade da observada em condições de deformação de 10% e um terço da taxa de corrosão observada com 20% de deformação. Essa variação na taxa de corrosão está relacionada aos diferentes estágios de deformação e destaca como a resistência à corrosão da liga evolui durante esses estágios iniciais de deformação. Por outro lado, a temperatura de conformação afetou diretamente a liga AM50, na qual um aumento na temperatura de conformação de 250°C para 280°C reduziu pela metade a taxa de corrosão, e um aumento adicional de temperatura para 350°C reduziu a taxa de corrosão para um quarto. Isso ocorreu devido à recristalização dinâmica pela elevação da temperatura, que refinou a estrutura do material, além disso a composição química, onde precipitados dispersos de RE impedem o crescimento dos grãos na matriz e diminuiu a suscetibilidade à corrosão, logo houve, em uma significativa redução na taxa de corrosão com o aumento da temperatura, como representado na Figura 4a.

Figura 4: (a) O efeito da temperatura de deformação na corrente de corrosão [i] em AM50 com 10% de deformação. (b) Efeito da quantidade de deformação no comportamento de corrosão em AZ31 a temperatura constante e (c) o efeito nas ligas AZ31, AM50 e ZK60 a temperatura constante.



Fonte: Adaptado de [22].

Pode-se observar na Figura 4c, onde a liga ZK60 exibiu um aumento acelerado na taxa de corrosão, enquanto as ligas AZ31 e AM50 mostraram inicialmente uma queda na taxa de corrosão.

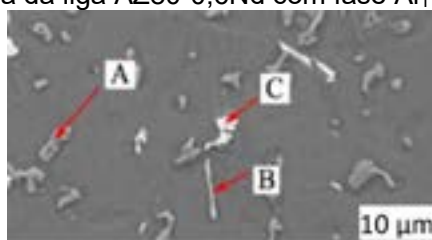
Em resumo, este estudo ressalta a importância da interação entre fatores metalúrgicos e termodinâmicos resultantes da deformação plástica na resistência à corrosão de ligas de magnésio. As complexas interações entre mudanças microestruturais, endurecimento por deformação e taxa de corrosão destacam

a necessidade de considerar o estado termomecânico das ligas ao selecionar processos de conformação, como verificar a temperatura de conformação e velocidade do ensaio.

A resistência à fluência foi correlacionada à quantidade de fase intermetálica presente nas ligas. As ligas de Mg-La e Mg-Ce, que tinham mais fase intermetálica, tinham resistência à fluência semelhante. No entanto, a liga de Mg-Nd, com a menor quantidade de fase intermetálica, apresentou a melhor resistência à fluência. Em síntese, as ligas de Mg com RE (especialmente Nd) e precipitados apresentaram melhor resistência à fluência. Vale ressaltar que a influência dos precipitados formados com o Mg e dos RE nas propriedades mecânicas é mais notável do que o reforço dos contornos de grão pelas fases intermetálicas [22].

Ao pesquisar sobre o efeito da adição de RE nas ligas de Mg, Jiang et al. [6] investigaram seis diferentes ligas que foram preparadas, variando suas composições, incluindo a adição de Al, Zn, Mn, Nd e Gd em forma de ligas mestras. O processo de fundição foi conduzido sob atmosfera de gás argônio de alta pureza, com controle rigoroso de temperatura. A análise da microestrutura foi realizada por difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura, revelando a formação de várias fases intermetálicas, incluindo $Al_{11}Nd_3$, Al_2Gd e Al_2Nd . A microestrutura foi fortemente influenciada pela adição de elementos de terras raras, resultando em uma variedade de fases e morfologias. Observou-se que a adição de Nd refina as fases β - $Mg_{17}Al_{12}$ e introduz uma nova fase em forma de haste, $Al_{11}Nd_3$, na liga AZ80 modificada por RE, como pode ser visualizado na Figura 5, por meio de análises de difração de raios-X e espectroscopia de energia dispersiva (EDS), explana o formato das mesmas. Além disso, a presença de Gd contribuiu para o surgimento de fases em forma de bloco, como Al_2Gd e Al_2Nd . A análise das propriedades mecânicas das ligas revelou melhorias notáveis com a adição de RE. Especificamente, a liga AZ80-0,6Nd-0,6Gd apresentou propriedades mecânicas otimizadas, com aumento significativo da resistência à tração, limite de escoamento e alongamento.

Figura 5: Microestrutura da liga AZ80-0,6Nd com fase $Al_{11}Nd_3$ em forma de haste.



Fonte: Adaptado de [6].

Na Figura 5, pode se verificar que a incorporação de RE nas ligas de Mg resulta em uma microestrutura modificada, com a formação de várias fases intermetálicas. Essas mudanças na microestrutura contribuíram diretamente para o aprimoramento das propriedades mecânicas das ligas, tornando-as mais resistentes e duráveis. A presença das fases $Al_{11}Nd_3$, Al_2Gd e Al_2Nd demonstrou ser crucial para o aumento da resistência mecânica das ligas, enquanto a proporção específica dos RE influenciou a morfologia e a quantidade dessas fases, impactando nas propriedades finais [6].

O comportamento de corrosão das ligas AZ91D e Mg-3,0Nd-0,2Zn-0,4Zr em uma solução de NaCl a 5% foi estudado por Ding et al. [23] e os resultados revelaram que a taxa de corrosão da liga Mg-3,0Nd-0,2Zn-0,4Zr (NZK) é apenas a metade da taxa de corrosão da liga AZ91D. Isso ocorre devido a uma maior diferença de potencial entre as fases catódicas e anódicas e uma maior relação de área entre o catodo e o anodo na liga AZ91D.

Logo, a incorporação de RE, como o Nd, em ligas de magnésio não apenas aumenta diretamente a resistência à corrosão [6] e [15], mas também desencadeia um efeito indireto significativo, aumentando a estabilidade térmica da liga. Isso ocorre, pois, esses elementos formam precipitados que evitam o crescimento excessivo de grãos durante a recristalização, proporcionando uma barreira adicional contra a corrosão [6], [15] e [22]. Dessa forma, a presença das RE contribui não apenas para a formação de precipitados protetores, mas também para a manutenção da estrutura da liga em temperaturas elevadas, resultando em um desempenho mais robusto e duradouro em ambientes corrosivos [6], [15] e [22].

CONCLUSÃO

Os estudos relatados nesta revisão da literatura constataram que a incorporação de terras raras em ligas de magnésio proporciona uma estratégia promissora para melhorar a conformabilidade e resistência à corrosão. Ligas como WE43, ZE10A, Mg-2,60Nd, Mg-3,0Nd-0,2Zn-0,4Zr e AZ91+0,5Nd ilustram as melhorias significativas em alongamento alcançadas com a adição de elementos como Zr, Zn e Nd. Ligas contendo Nd, por exemplo, apresentam uma resistência mecânica até 40% maior do que o magnésio puro, com uma capacidade de deformação até 3,5 vezes maior. Em comparação com a liga AZ31B que não

possui terras raras, apresentem uma resistência mecânica 6% menor, sua capacidade de deformação até a ruptura é 30% superior. A incorporação desses elementos na matriz favorece a formação de grãos menores, relacionada à recristalização dinâmica durante a deformação a morno e à quente, tornando a estrutura mais homogênea e eficaz na criação de camadas protetoras contra corrosão.

Além disso, a adição de RE restringe o crescimento dos grãos e ativa mais planos de escorregamentos durante a deformação a morno e a quente. Isso reduz o endurecimento por deformação e refina os grãos, tornando as ligas mais conformáveis e, ao mesmo tempo, mais resistentes à corrosão, o que é benéfico para diversas aplicações industriais. Sob deformação a quente, a recristalização dinâmica tende a afinar ainda mais a microestrutura, melhorando a resistência à corrosão. Ligas de Mg com Nd demonstram melhor resistência à corrosão em comparação com a liga AZ91D, com uma taxa de corrosão de Mg-3,0Nd-0,2Zn-0,4Zr sendo apenas metade da taxa de corrosão da liga AZ91D em uma solução de NaCl a 5%. Isso resulta em benefícios notáveis tanto na resistência mecânica quanto na resistência à corrosão, apesar do fato de que adicionar elementos a um material puro geralmente reduz a resistência à corrosão, mas melhora a resistência mecânica.

Esses avanços têm implicações significativas em setores como o automotivo e aeroespacial, onde materiais leves e duráveis são cruciais. O entendimento aprofundado desses mecanismos é fundamental para orientar o desenvolvimento de ligas de magnésio enriquecidas com terras raras, o processamento das mesmas, e a obtenção de propriedades superiores.

REFERÊNCIAS

- [1] SONG, G. L.; ATRENS, A. Corrosion Mechanisms of Magnesium Alloys. *Advanced Engineering Materials*, 1999, v. 1, n. 1, p. 11.
- [2] TUNOLD, R. et al. The Corrosion of Magnesium in Aqueous Solution Containing Chloride Ions. *Corrosion Science*, 1977, v. 17, p. 353-365. Pergamon Press. Printed in Great Britain.
- [3] MAKAR, G. L and KRUGER, J. Corrosion Studies of Rapidly Solidified Magnesium Alloys. *Journal of the Electrochemical Society*, New York, V. 137, n° 02, p. 414-421, February 1990.
- [4] XIAO, H. C.; JIANG, S. N.; TANG, B.; HAO, W. H.; GAO, Y. H.; CHEN, Z. Y.; LIU, C. M.; Hot deformation and dynamic recrystallization behaviors of Mg-Gd-Y-Zr alloy, *Materials Science & Engineering A*, 2015.
- [5] GUSIEVA, K.; DAVIES, C. H. J.; SCULLY, J. R.; BIRBILIS, N. Corrosion of magnesium alloys: the role of alloying. *International Materials Reviews*, v. 60, n. 3, p. 169-194, 2015. DOI: 10.1179/1743280414Y.0000000046.
- [6] JIANG N., CHEN L., MENG L., FANG C., HAO H., ZHANG X. Effect of neodymium, gadolinium addition on microstructure and mechanical properties of AZ80 magnesium alloy. *JOURNAL OF RARE EARTHS*, Elsevier, Vol. 34, No. 6, (2016), P. 632.
- [7] AL-SAMMAN, T.; LI, X. Sheet texture modification in magnesium-based alloys by selective rare earth alloying. *Materials Science and Engineering A*, v. 528, p. 3809–3822, 2011.
- [8] MENG, J.; SUN, W.; TIAN, Z.; QIU, X.; ZHANG, D. Corrosion performance of magnesium (Mg) alloys containing rare-earth (RE) elements. 2013. DOI: 10.1533/9780857098962.1.38.
- [9] CHANG, J.-W., DUO, J., XIANG, Y.-Z., YANG, H.-Y., DING, W.-J., & PENG, Y.-H. Influence of Nd and Y additions on the corrosion behaviour of extruded Mg-Zn-Zr alloys. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, v. 18, n. 2, p. 203, 2011.
- [10] SONG, Y.; SHAN, D.; CHEN, R.; HAN, E.-H. Effect of second phases on the corrosion behaviour of wrought Mg-Zn-Y-Zr alloy. *Corrosion Science*, v. 52, p. 1830-1837, 2010.
- [11] DIERINGA, Hajo; BOHLEN, Jan; HORT, Norbert; LETZIG, Dietmar; KAINER, Karl Ulrich. *Advances in Manufacturing Processes for Magnesium Alloys*. Magnesium Technology. The Minerals, Metals & Materials Society, 2014.
- [12] ATWELL, D. L. et al. The effect of initial grain size and temperature on the tensile properties of magnesium alloy AZ31 sheet. *Materials Science and Engineering A*, 2012, v. 549, p. 1-6, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.03.107>.
- [13] WEI, Kang et al. Grain size effect on tensile properties and slip systems of pure magnesium. *Acta Materialia*, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.116604>.
- [14] ZHANG, K. et al. Evolution of twinning and shear bands in magnesium alloys during rolling at room and cryogenic temperature. *Materials and Design*, 2020, 193, n. 108793, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108793>.
- [15] SHRESTHA, N.; UTGIKAR, V.; RAJA, K. S. The Effect of Grain Size on the Corrosion Behavior of Mg-RE Alloy ZE10A. *ECS Transactions*, The Electrochemical Society, v. 85, n. 13, p. 671-682, 2018.
- [16] RALSTON, K. D.; BIRBILIS, N.; DAVIES, C. H. J. Revealing the relationship between grain size and corrosion rate of metals. *Scripta Materialia*, Elsevier, v. 63, p. 1201-1204, 2010.
- [17] ARGADE, G. R.; PANIGRAHI, S. K.; MISHRA, R. S. Effects of grain size on the corrosion resistance of wrought magnesium alloys containing neodymium. *Corrosion Science*, Elsevier, Volume 58, p. 145-151, 2012.
- [18] COY, A. E.; VIEJO, F.; SKELDON, P.; THOMPSON, G. E. Susceptibility of rare-earth-magnesium alloys to microgalvanic corrosion. *Corrosion Science*, v. 52, n. 12, p. 3896–3906, 2010. DOI: 10.1016/j.corsci.2010.08.006.
- [19] LIU, M., P. Schmutz, P.J. UGGOWITZER, G. SONG, and ATRENS, A. The influence of yttrium (Y) on the corrosion of Mg-Y binary alloys. *Corrosion Science*, (2010). 52 (11): 3687–3701.

- [20] DONG, Jingren; ZHANG, Dingfei; SUN, Jing; DAI, Qingwei; PAN, Fusheng. Effects of Different Stretching Routes on Microstructure and Mechanical Properties of AZ31B Magnesium Alloy Sheets. *Journal of Materials Science & Technology*, v. 31, p. 935-940, 2015.
- [21] ZHU, S. M.; GIBSON, M. A.; EASTON, M. A.; NIE, J. F. The relationship between microstructure and creep resistance in die-cast magnesium–rare earth alloys. *Scripta Materialia*, v. 63, p. 698-703, 2010.
- [22] SNIR, Y.; BEN-HAMU, G.; ELIEZER, D.; ABRAMOVA, E. Effect of compression deformation on the microstructure and corrosion behavior of magnesium alloys. Department of Materials Engineering, Ben-Gurion University of the Negev, Beer-Sheva 84105, Israel; Department of Mechanical Engineering, Sami Shamoon College of Engineering, Beer-Sheva 84100, Israel.
- [23] DING, W.-J.; XIANG, Y.-Z.; CHANG, J.-W.; PENG, Y. Corrosion and electrochemical behaviour of Mg-Al alloys and Mg-RE alloys in NaCl solution. *Materials Science, Corrosion*. v. 19, p. 1713-1719, 2009.

DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS E PROCESSOS PARA MANUFATURA ADITIVA PARA A INDÚSTRIA 4.0.¹

Vinicius Martins²
Pedro Carlos Hernandez Junior³
Emerson Luiz de Souza⁴
Felipe da Silva Ramos⁵
Lirio Scafeffer⁶

Resumo

A Indústria 4.0 está revolucionando a sociedade, combinando tecnologias avançadas, automação inteligente e a personalização de produtos, que está impulsionando a produção de componentes metálicos complexos e de alto desempenho, redefinindo os padrões da indústria. A metalurgia do pó e a manufatura aditiva representam inovações fundamentais na fabricação de peças metálicas. Este artigo destinou-se a determinar o polímero estrutural com o melhor lubrificante a serem utilizados no processo de impressão. Realizaram-se reologia e DSC/TGA do polietileno de baixa densidade linear como polímero estrutural e, parafina e cera de carnaúba como lubrificantes mais adequados ao processo de impressão 3D utilizando uma impressora FDM com carga injetável metálica para obtenção das peças. A partir do entendimento da relação dos PEDBL e das ceras como aglutinante será constituindo a carga injetável metálica.

Palavras-chave: Industria 4.0; Metalurgia do pó, Ceras e PEDBL.

¹ *Contribuição técnica a ser apresentada no 42ª Senafor - 1ª Conferência Internacional de Inovação em Materiais e Manufatura - INOVMAT – Brasil/RS, 4, 5 e 6 de outubro de 2023, Porto Alegre, RS, Brasil.*

² *Professor Doutor do Instituto Federal Sul-rio-grandense – IFSul – Campus Sapucaia do Sul, RS, Brasil. viniciusmartins@ifsul.edu.br*

³ *Professor Doutor do Instituto Federal Sul-rio-grandense – IFSul – Campus Sapucaia do Sul, RS, Brasil. pedrohernandez@ifsul.edu.br*

⁴ *Graduando da engenharia Mecânica do Instituto Federal Sul-rio-grandense – IFSul – Campus Sapucaia do Sul, RS, Brasil. elsouza215@gmail.com*

⁵ *Graduando da engenharia Mecânica do Instituto Federal Sul-rio-grandense – IFSul – Campus Sapucaia do Sul, RS, Brasil. felipe.mlbwc@gmail.com*

⁶ *Prof. Dr. -Ing., Professor Colaborador do Laboratório de transformação Mecânica (LdTM), Depto. de Metalurgia, PPGE3M, UFRGS. E coordenador do Centro Brasileiro de Conformação Mecânica. Porto Alegre, RS, Brasil. schaefer@ufrgs.br*

1. INTRODUÇÃO

A integração de materiais avançados e processos inovadores desempenha um papel fundamental na revolução da Indústria 4.0, que está moldando o futuro da manufatura e produção industrial. Um dos campos mais promissores que está se destacando nesse cenário é o desenvolvimento de materiais e processos para a manufatura aditiva, utilizando a metalurgia do pó. Essa abordagem revolucionária combina a flexibilidade da manufatura aditiva com a precisão e as propriedades excepcionais dos materiais produzidos a partir de pós metálicos.

A manufatura aditiva, baseada na construção de objetos camada por camada, oferece a capacidade de criar peças altamente complexas e personalizadas, reduzindo o desperdício de material e permitindo a produção sob demanda. No entanto, a qualidade e as características dos materiais utilizados desempenham um papel crucial no sucesso dessa tecnologia. É aqui que a metalurgia do pó entra em cena, fornecendo a base para a utilização de pós metálicos altamente especializados e personalizados que atendem às demandas específicas da manufatura aditiva na Indústria 4.0. [1], [2].

1.1 Indústria 4.0, e a demanda de materiais e processos diferenciados

A Indústria 4.0 representa uma revolução no campo da manufatura e da produção, sendo impulsionada pela integração de tecnologias avançadas e automação em processos industriais. Ela se baseia em quatro pilares principais: a digitalização, a conectividade, a inteligência artificial e a automação avançada. Inicialmente, a manufatura avançada, também chamada de quarta revolução industrial promove a união dos recursos físicos e digitais, conectando máquinas, sistemas e ativos a fim de produzir itens de maior qualidade a custos reduzidos, onde inicialmente foi definida com 16 pilares, conforme a Figura 1, [3].



Figura 1: 16 Pilares da Manufatura avançada.

Mas durante o desenvolvimento do entendimento da quarta revolução industrial, que foi cunhado o conceito em 2012, houve a restrição dos pilares e entendeu-se que a nanotecnologia, é uma área de pesquisa e desenvolvimento que se concentra na manipulação de materiais e sistemas em escala nanométrica. Embora a nanotecnologia possa ser aplicada em uma ampla variedade de campos, incluindo a manufatura aditiva, ela é geralmente considerada uma tecnologia separada que avança paralelamente. No entanto, é importante notar que a nanotecnologia desempenha um papel significativo no desenvolvimento de materiais avançados usados na manufatura aditiva. Materiais nanocompósitos, por exemplo, podem ser usados para criar peças com propriedades excepcionais, como maior resistência e condutividade. Portanto, embora a nanotecnologia não seja diretamente considerada um dos pilares da manufatura aditiva, ela continua a ser uma área importante de pesquisa e desenvolvimento que contribui para o avanço dessa tecnologia. A Figura 2 apresenta os nove pilares da indústria 4.0 [4].



Figura 2: 9 Pilares da Manufatura avançada na indústria [4].

Esses conceitos da Figura 2, representam tecnologias e abordagens-chave que impulsionam a transformação digital em diversos setores da sociedade e da indústria [5].

- **Internet das Coisas (IoT)** refere-se à conexão de dispositivos e objetos do cotidiano à internet, permitindo a coleta e compartilhamento de dados em tempo real para automação e controle.
- **Robôs autônomos** são máquinas programadas para operar de forma independente, tomando decisões e executando tarefas sem intervenção humana direta.
- **Big Data e análise** se referem à coleta, armazenamento e análise de grandes volumes de dados para obter insights valiosos e tomar decisões informadas.
- **Computação na nuvem** é um modelo de entrega de serviços de TI pela internet, permitindo o acesso a recursos computacionais escaláveis e flexíveis.
- **Cybersegurança** envolve medidas e práticas para proteger sistemas, redes e dados contra ameaças e ataques cibernéticos.
- **Manufatura aditiva** é um processo de fabricação que constrói objetos camada por camada, permitindo maior flexibilidade e personalização.
- **Simulação** refere-se à modelagem computacional de sistemas para prever comportamentos e resultados, frequentemente utilizada para testar e aprimorar projetos.
- **Realidade aumentada** é a sobreposição de elementos virtuais no mundo real, enriquecendo a percepção do usuário por meio de dispositivos como óculos ou smartphones.
- **Integração de sistemas** envolve a conexão e coordenação de diferentes sistemas de software e hardware para melhorar a eficiência e a interoperabilidade.

Essa revolução na indústria cria uma necessidade crescente de novos materiais que sejam compatíveis com as demandas sociedade, que desempenham um papel crucial em todos os nove pilares da Indústria 4.0. O que exige materiais que possam suportar condições de produção mais rigorosas e oferecer características como resistência ao calor, à corrosão e à abrasão. Além disso, materiais personalizados são necessários para a fabricação de produtos altamente customizados e adaptáveis, que são uma característica central da Indústria 4.0. Portanto, o desenvolvimento contínuo de materiais e processos são essenciais para acompanhar as demandas dessa nova era industrial, impulsionando a inovação, a eficiência e a competitividade nas empresas que adotam essas tecnologias avançadas [5].

A Indústria 4.0, também conhecida como a Quarta Revolução Industrial, tem desencadeado uma demanda crescente por materiais e processos diferenciados, transformando profundamente a maneira como a produção e a manufatura são realizadas. A Indústria 4.0 permite a produção em lote único, personalizada de produtos, o que requer materiais que possam ser facilmente adaptados e processos ágeis que possibilitem essa flexibilidade. Além disso, a necessidade de monitoramento em tempo real e análise de dados requer materiais que possam incorporar sensores e tecnologias de conectividade [5].

Outra razão importante é a busca por sustentabilidade e eficiência energética. Materiais mais leves e resistentes são necessários para reduzir o consumo de energia na produção e no transporte de produtos. Além disso, materiais recicláveis e processos de fabricação de baixo impacto ambiental estão sendo desenvolvidos para atender às preocupações ambientais crescentes. A segurança também é um fator crítico na Indústria 4.0, e isso se reflete na demanda por materiais que possam resistir a ambientes industriais adversos e oferecer proteção contra ameaças cibernéticas. Materiais que podem suportar altas temperaturas, corrosão e outras condições extremas são fundamentais para a operação segura de sistemas de produção automatizados. Essa demanda por materiais e processos diferenciados está incentivando a

pesquisa e o desenvolvimento contínuos, levando a avanços significativos na ciência dos materiais e na tecnologia de produção [6].

1.2 Desenvolvimento de materiais

O desenvolvimento de materiais é uma área fundamental da ciência e engenharia que desempenha um papel essencial em praticamente todos os setores da sociedade. Novos materiais são a base para inovações tecnológicas, avanços na medicina, aprimoramento da eficiência energética e muito mais. Essa pesquisa e desenvolvimento contínuo são conduzidos por cientistas, engenheiros e pesquisadores que buscam criar substâncias com propriedades específicas para atender às necessidades em constante evolução [7].

Uma das principais motivações para o desenvolvimento de novos materiais é a busca por materiais mais leves e resistentes, especialmente em setores como a indústria aeroespacial e automotiva. Além disso, a melhoria da sustentabilidade está impulsionando a pesquisa de materiais mais ecológicos, que possam ser reciclados e reutilizados de forma mais eficiente. O desenvolvimento de materiais avançados também desempenha um papel crucial na criação de dispositivos eletrônicos mais rápidos e eficientes, bem como na medicina, onde biomateriais são desenvolvidos para próteses e implantes [7].

A nanotecnologia desempenhou um papel significativo no avanço do desenvolvimento de materiais, permitindo a manipulação de estruturas materiais em escalas nanométricas. Isso resultou na criação de materiais como os nanocompósitos com propriedades excepcionais, como maior resistência e condutividade [8].

1.3 A metalurgia do pó

A metalurgia do pó consiste em conformar pós de metais, ligas metálicas, e pós de compósitos em peças resistentes, moldando os pós com formato desejado obtendo um "compactado à verde" por pressão mecânica de algum dos processos e que será sinterizado. Peças fabricadas por metalurgia do pó possuem certa porosidade, que pode ser controlada por meio de fatores como pressão de compactação, temperatura e tempo de sinterização, tamanho e forma das partículas do pó, etc. A peça pronta apresenta bom acabamento superficial e adequada tolerâncias dimensionais (9).

A metalurgia do pó busca transformar sem fusão efetiva, pós metálicos ou não metálicos usando pressão e calor, por meio de um tratamento térmico de sinterização, que se realiza a temperatura inferior ao ponto de fusão do material base do componente ou peça, permitindo obtê-los na sua forma final. (10).

1.4 Manufatura aditiva

A manufatura aditiva, também conhecida inicialmente como impressão 3D, é uma revolução na indústria de fabricação e produção. Diferentemente dos métodos tradicionais de fabricação, que envolvem a remoção de material a partir de um bloco bruto (manufatura subtrativa), a manufatura aditiva cria objetos camada por camada, adicionando material conforme necessário. Isso proporciona uma série de vantagens notáveis [11].

Uma das principais vantagens da manufatura aditiva é a capacidade de produzir peças altamente complexas e personalizadas de forma eficiente. Isso é particularmente útil em setores como a medicina, onde próteses e implantes personalizados podem ser impressos para se adequar perfeitamente às necessidades do paciente. Além disso, a manufatura aditiva oferece uma maior liberdade de design, permitindo a criação de geometrias que seriam difíceis ou impossíveis de se alcançar com métodos tradicionais [12].

Outra vantagem é a redução de desperdício de material. Enquanto os métodos subtrativos frequentemente geram uma quantidade significativa de resíduos, a manufatura aditiva utiliza apenas o material necessário para construir a peça, o que a torna mais sustentável e econômica. Além disso, a manufatura aditiva permite a produção sob demanda, eliminando a necessidade de grandes estoques de peças. A manufatura aditiva tem aplicações em diversos setores, desde aeroespacial até automotivo, arquitetura, moda e muito mais. No entanto, desafios como a velocidade de impressão, a qualidade dos materiais e a escalabilidade ainda precisam ser abordados para uma adoção mais ampla. No entanto, à medida que a tecnologia continua a evoluir, a manufatura aditiva promete transformar ainda mais a forma como produtos são projetados, produzidos e consumidos em todo o mundo. A Figura 3 mostra uma máquina de impressão 3D por modelagem de deposição fundida [13].



Figura 3: Impressão 3D por processo FDM [13]

A Figura 3 exibe a modelagem de deposição fundida, (*Fused Deposition Modeling* – FDM), é um método de fabricação aditiva onde camadas de materiais poliméricos que são fundidas em um padrão para criar um objeto.

1.5 A Manufatura aditiva produzida com a metalurgia do pó

A metalurgia do pó e a manufatura aditiva são duas tecnologias que têm convergido de maneira significativa na Indústria 4.0, contribuindo para avanços notáveis na produção de componentes e peças em diversas aplicações. A metalurgia do pó é um processo que envolve a transformação de materiais metálicos em pós finos, que podem ser usados na fabricação de peças metálicas por meio da manufatura aditiva, como a **Sinterização a Laser Seletiva (SLS)**. É uma tecnologia de impressão 3D baseada em pó que usa um laser para sinterizar camadas de material em uma peça final. O laser traça o padrão de cada seção transversal de um design 3D em um leito de pó. Após a formação de uma camada, a plataforma de construção abaixa e outra camada é construída sobre a camada anterior. Esse processo continua até que cada camada seja construída e a peça esteja completa [14].

A combinação da metalurgia do pó e da manufatura aditiva oferece uma série de benefícios importantes. Em primeiro lugar, a metalurgia do pó permite a criação de ligas metálicas personalizadas e materiais com propriedades específicas, o que é essencial para atender às demandas da manufatura aditiva, que frequentemente requer materiais com características excepcionais de resistência, condutividade, e outras propriedades. Além disso, a metalurgia do

pó é especialmente adequada para a manufatura aditiva, uma vez que os pós metálicos podem ser alimentados diretamente nas “máquinas de impressão” 3D, permitindo a criação de peças metálicas complexas e precisas com facilidade. Isso é particularmente relevante em indústrias como a aeroespacial, onde a leveza e a resistência são fundamentais [14].

Essa combinação também proporciona a oportunidade de otimizar a eficiência da produção, uma vez que a manufatura aditiva e a metalurgia do pó reduzem significativamente o desperdício de material em comparação com processos tradicionais de usinagem. Essa eficiência é vital na Indústria 4.0, onde a produção personalizada e sob demanda é uma tendência crescente. A integração da metalurgia do pó com a manufatura aditiva é uma evolução importante na fabricação de peças metálicas avançadas. Ela oferece maior flexibilidade, personalização, eficiência e qualidade na produção de componentes em diversos setores industriais, impulsionando a inovação e o progresso tecnológico na Indústria 4.0. A Figura 4 mostra um desenho esquemático do processo SLS [15].

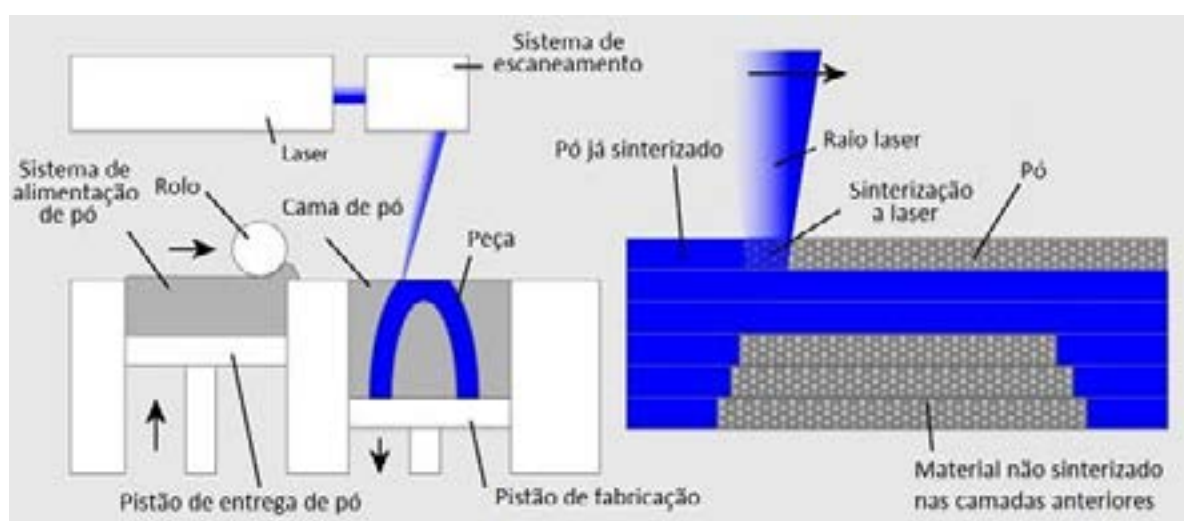


Figura 4: Desenho esquemático do processo SLS [15].

A Figura 4 exibe o processo SLS, que a sinterização a laser seletiva é um processo versátil que continua a desempenhar um papel fundamental na manufatura moderna, oferecendo a capacidade de criar peças complexas com uma variedade de materiais, proporcionando flexibilidade e eficiência na produção. Porém, o custo de obtenção destas máquinas é altíssimo, o que dificulta a indústria nacional comprar. O objetivo deste trabalho é trazer uma alternativa utilizando o processo de obtenção das cargas injetáveis da moldagem de pós por injeção (MIM), que é um dos processos da metalurgia do pó e alterando uma impressora de FDM para que a mesma possa imprimir as peças a verde com a carga metálica. Posteriormente a obtenção da peça impressa, será realizado a extração química e térmica e a sinterização.

1.6 Polímeros e ceras

Diversos pesquisadores concentraram-se no efeito da composição do ligante sobre as propriedades reológicas das matérias-primas, em particular os papéis de componentes dos ligantes e suas inter-relações permanecem obscuros [16], [17], [18]. Foram comparados quatro tipos de cera como a parafina, cera de carnaúba e de polietileno, Acrawax, servindo, juntamente com o polietileno linear de baixa densidade - PEBDL, como um ligante para o aço inoxidável 304L.

A cera de carnaúba (carnauba wax – C60-O2-H110) é extraída das folhas da carnaubeira, muito utilizada na fabricação de velas, pastas polidoras, vernizes, impermeabilização de papel e auxiliar de processo em composições de fluoroelastômeros [19]. Sendo uma cera muito utilizada

como lubrificante nas cargas injetável devido a sua alta molhabilidade nas partículas de pó [20]. A viscosidade a 99 °C está na faixa de 30 a 40 mPas [21].

A Parafina (*paraffin wax*) é formada por hidrocarbonetos saturados (alcanos) de cadeia aberta, geralmente com mais de 18 carbonos na molécula, muito utilizada como lubrificante, [19], [22]. Diversas pesquisas realizadas utilizam a parafina como lubrificante [23]. Os resultados das medições do teor de oxigênio indicam que a principal causa da deterioração da matéria-prima é a oxidação dos componentes da pasta, particularmente a parafina durante a reciclagem [24]. A viscosidade a 65 °C é de 5,53 mPas [25].

A cera de abelha (*Beeswax*) é uma cera natural produzido na colmeia de abelhas. Trata-se principalmente de ésteres de ácidos graxos e vários álcoois de cadeia longa. Excelente lubrificante na constituição de cargas injetáveis, geralmente substitui a cera de carnaúba atuando junto com a parafina e um polímero estrutural, sendo muito utilizado em combinação com o EVA e o PE [26], [27].

Os termoplásticos são plásticos, que no seu aquecimento provoca o enfraquecimento das forças intermoleculares, tornando-os flexíveis ficando rígidos novamente após o resfriamento. O polietileno linear de baixa densidade (PEBDL - *Linear low-density polyethylene* - LLDPE) é um polímero linear que está em quase todos os mercados do polietileno de baixa densidade devido a sua baixa viscosidade, este é muito utilizado como polímero estrutural no processo de moldagem de pó metálico por injeção [20], [28].

O polietileno linear de baixa densidade (PEBDL - *Linear low-density polyethylene* - LLDPE) é um polímero linear que está em quase todos os mercados do polietileno de baixa densidade devido a sua baixa viscosidade, este é muito utilizado como polímero estrutural no processo de moldagem de pó metálico por injeção [20], [28].

1.7 Reologia de cargas metálicas

O estudo da mudança na forma e no fluxo do material chama-se de reologia, que é de enorme importância para conhecer o comportamento reológico dos sistemas multifásicos empregados em Moldagem de pós metálicos por injeção (MIM). Possui um comportamento pseudoplástico devido ao polímero, que faz com que a viscosidade decresça com o aumento da taxa de cisalhamento. O conhecimento das propriedades reológicas da matéria prima está baseado no estudo da viscosidade e de sua sensibilidade à taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) e à temperatura (T). O comportamento da taxa de cisalhamento durante a moldagem geralmente varia no intervalo entre 100 e 10000 s⁻¹ na temperatura do processo do polímero, onde a viscosidade máxima para moldagem é de 1000 Pa.s [29] A viscosidade (V_c) de um aglutinante deve ser inferior a 0,1 Pa.s, de forma a proporcionar matéria prima de PIM com viscosidade inferior a 103 Pa.s. Assim, os pesquisadores devem escolher corretamente uma configuração de teste para medidas reológicas. A reometria capilar é atualmente reconhecida como a melhor forma de prever o comportamento de fluxo dos compostos de PIM [30].

2. MATERIAIS E METODOS

Foram realizados testes de reologia para selecionar o polímero estrutural mais adequado para a constituição da carga injetável para a impressão de pó micrométrico de aço inoxidável 316L. Para melhorar a viscosidade da carga injetável foram adicionados lubrificantes comerciais como a parafina, a cera de abelha e a cera de carnaúba em proporções para avaliar a reologia, qual o melhor lubrificante ou a combinação destes para realizar a molhabilidade do pó metálico e a interação com o polímero.

A mistura do polímero com os aglutinantes para a obtenção da carga ocorreu no reômetro de torque da marca Haake Rheocord modelo EU3V. O procedimento adotado para a ordem da mistura foi observado de maneira empírica. O procedimento que possibilita a homogeneidade da

mistura inicia com a adição e fusão dos aglutinantes, seguido pelo polímero estrutural até a plastificação. A velocidade de 32 RPM é utilizada para misturar os materiais por 10 minutos, depois passou-se para 64 RPM por mais 10 minutos e pelos últimos 10 minutos. A massa é misturada com 96 RPM para melhor homogeneização da mistura da carga injetável. Esta metodologia do processo de mistura da carga injetável se mostrou mais eficiente durante a execução deste trabalho para uma boa homogeneização entre o polímero, ceras.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Iniciou-se em com o entendimento do processo de impressão por FDM, com intuito de obtenção de parâmetros e qualidade da impressão. Observou-se que era possível modificar caminhos de impressão que poderiam possibilitar novos parâmetros de qualidade como mostra a Figura 5.

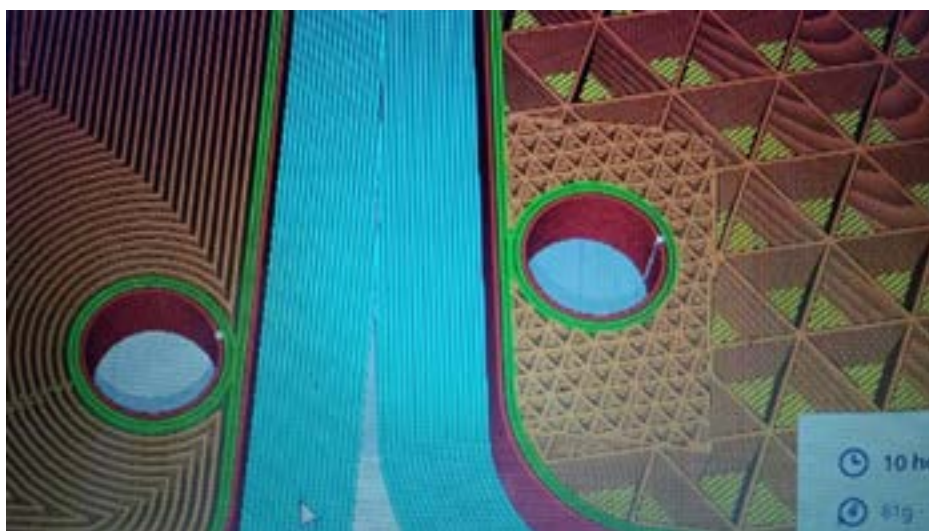


Figura 5: Exibe duas estratégias de impressão para a mesma peça.

A Impressora utilizada para a pesquisa foi a impressora marca Ultimaker S3 com o *software* Cura para gerar a estratégia de impressão e o código “G”. Foi impresso Auditório Pedro Kayser do Câmpus Sapucaia do Sul como é ilustrado na Figura 6



Figura 6: Miniatura impressa em FDM do Auditório Pedro Kayser

Foi realizada a análise dos polímeros de injeção com as ceras comerciais para obterem a caracterização e o comportamento térmico das ceras e juntamente com o plástico estrutural PEBDL. A Figura 7 exibe o DSC/TGA da parafina para entender o comportamento térmico.

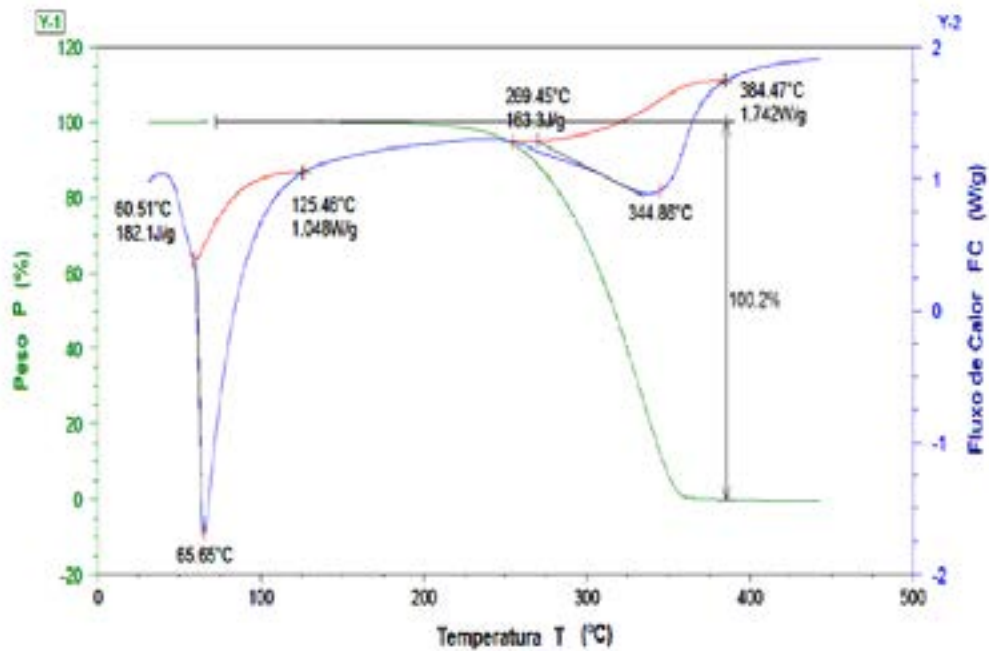


Figura 7: DSC/TGA da parafina.

A Figura 7 mostra que o ponto de fusão da parafina ocorre o início em 60,51 °C e funde em 65,65 °C. Acima de 200 °C ocorre o início da degradação térmica e termina em 345 °C. A Figura 8 mostra o DSC/TGA da cera de abelha.

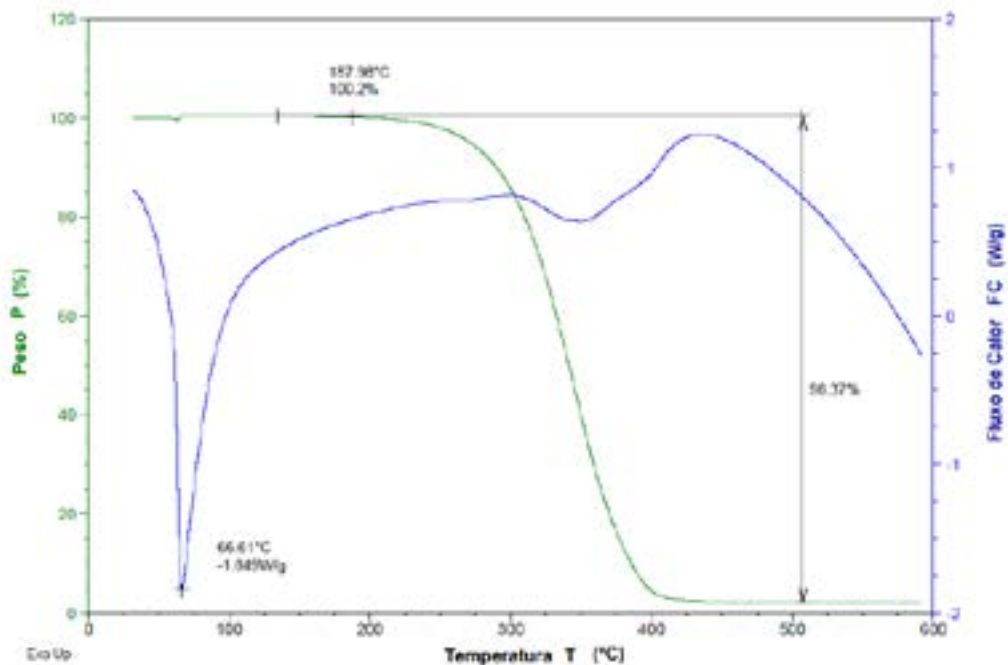


Figura 8: DSC/TGA da cera de abelha.

Na Figura 8 visualiza-se que o ponto de fusão da cera de abelha é 66,61 °C. Acima de 188 °C ocorre o início da degradação térmica e termina acima de 500 °C. A Figura 9 apresenta o DSC/TGA da cera de carnaúba.

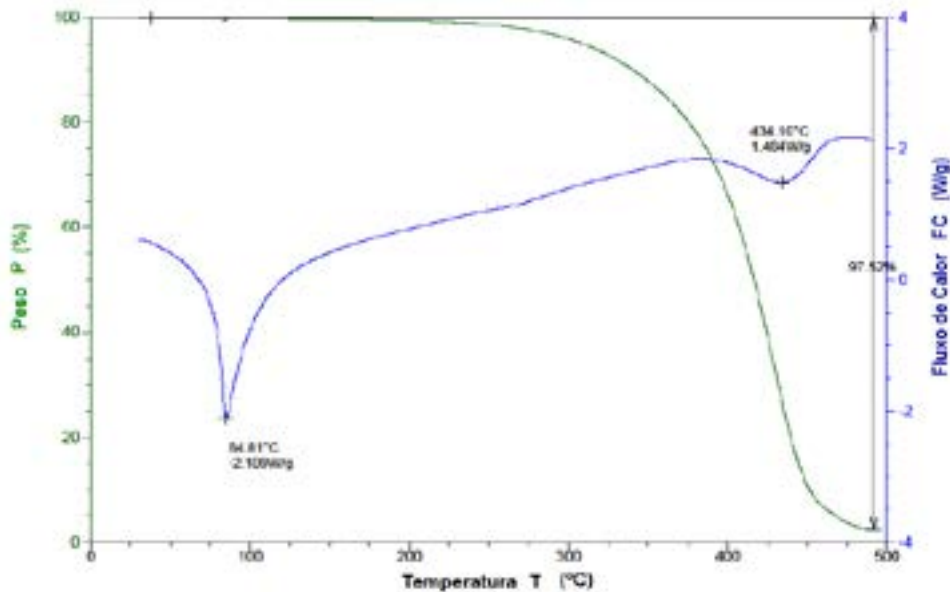


Figura 9: DSC/TGA da cera de carnaúba.

Na Figura 9 visualiza-se que o ponto de fusão da cera de carnaúba é 84,81 °C. Acima de 225 °C ocorre o início da degradação térmica e termina acima de 500 °C. Para melhor análise dos resultados de reologia foi escolhida apenas as últimas taxa de cisalhamento com altas taxas, conforme a Figura 10 exibe a reologia do PEBDL.

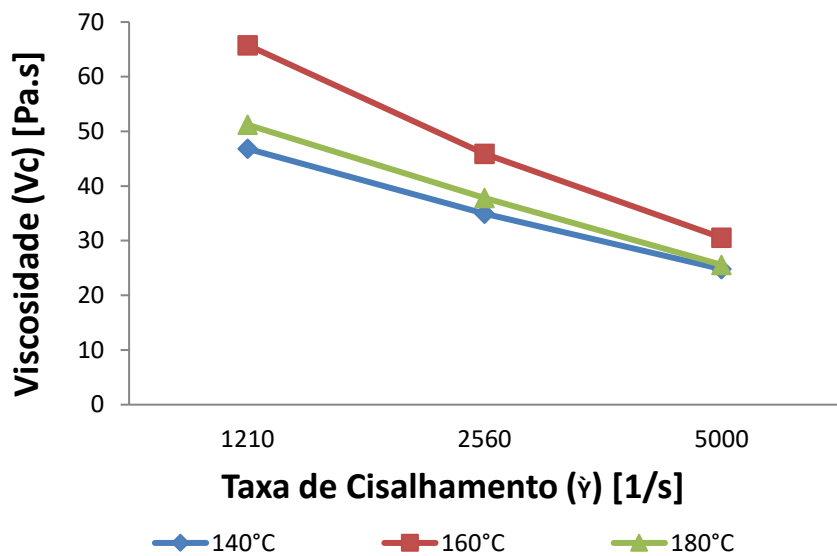


Figura 10: Avaliação reológica do PEBDL.

Nota-se que na Figura 10 a viscosidade diminuiu em função da temperatura e da taxa de cisalhamento apresentando o comportamento pseudo-plástico esperado. Há grande influência na viscosidade com a adição de ceras comerciais no PEBDL. A parafina pode ser facilmente extraída quimicamente com o hexano como solvente, devido a propriedade desta cera. A mesma foi mantida na composição da parte aglomerante para a constituição da carga injetável. Para avaliar a interação dos lubrificantes, foram testadas proporções diferentes entre as ceras (parafina e cera de abelha). Dos 25 % de ceras no sistema ligante da carga injetável, estipulou-se a mesma relação de 25% (6,25% do total do ligante), 50% (12,5% do total do ligante) e 75% (18,75% do total do ligante) da combinação das ceras. A Figura 11 mostra a relação entre a cera de abelha e a parafina como lubrificante no PEBDL como polímero estrutural.

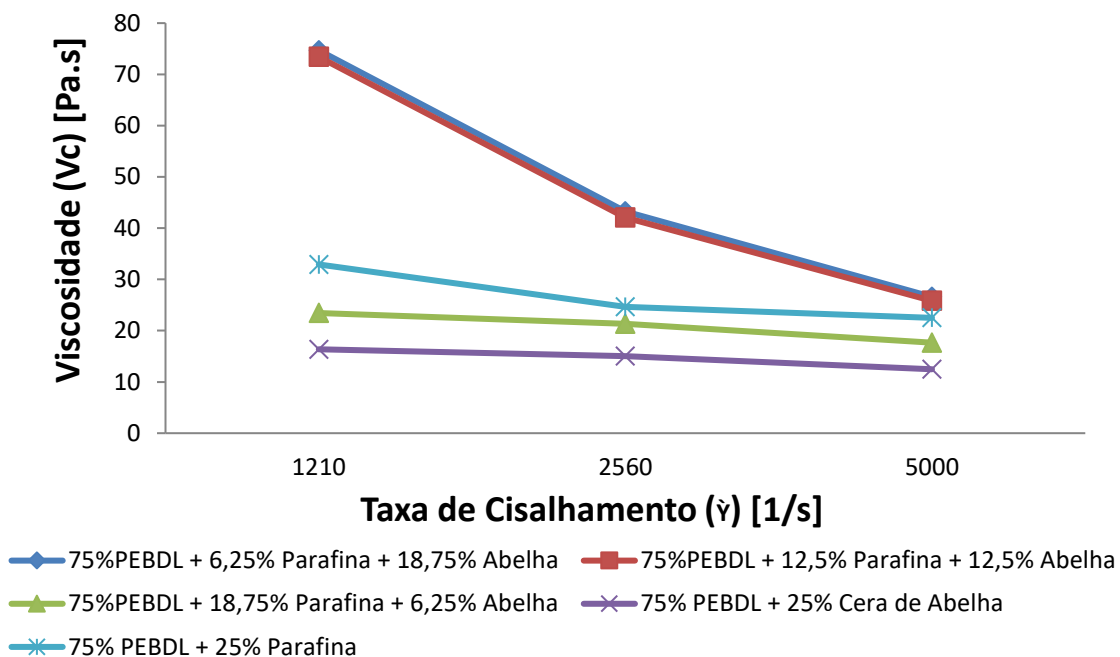


Figura 11: Avaliação reológica do PEBDL com a adição de cera de abelha e parafina.

Nota-se que a cera de abelha adicionada separadamente ao PEBDL diminui enormemente a viscosidade da mistura sendo a mais indicada como lubrificante na constituição de uma carga injetável. Porém, a parafina tem o menor ponto de fusão e total remoção durante a extração química com o hexano como solvente. Analisando comparativamente os resultados das Figuras 10 e 11, a cera de carnaúba se mostrou muito melhor que o resultado da cera de abelha, desta maneira optou-se pela a cera de carnaúba. A Figura 12 exhibe a relação entre a cera de carnaúba e a parafina como lubrificante no PEBDL como polímero estrutural.

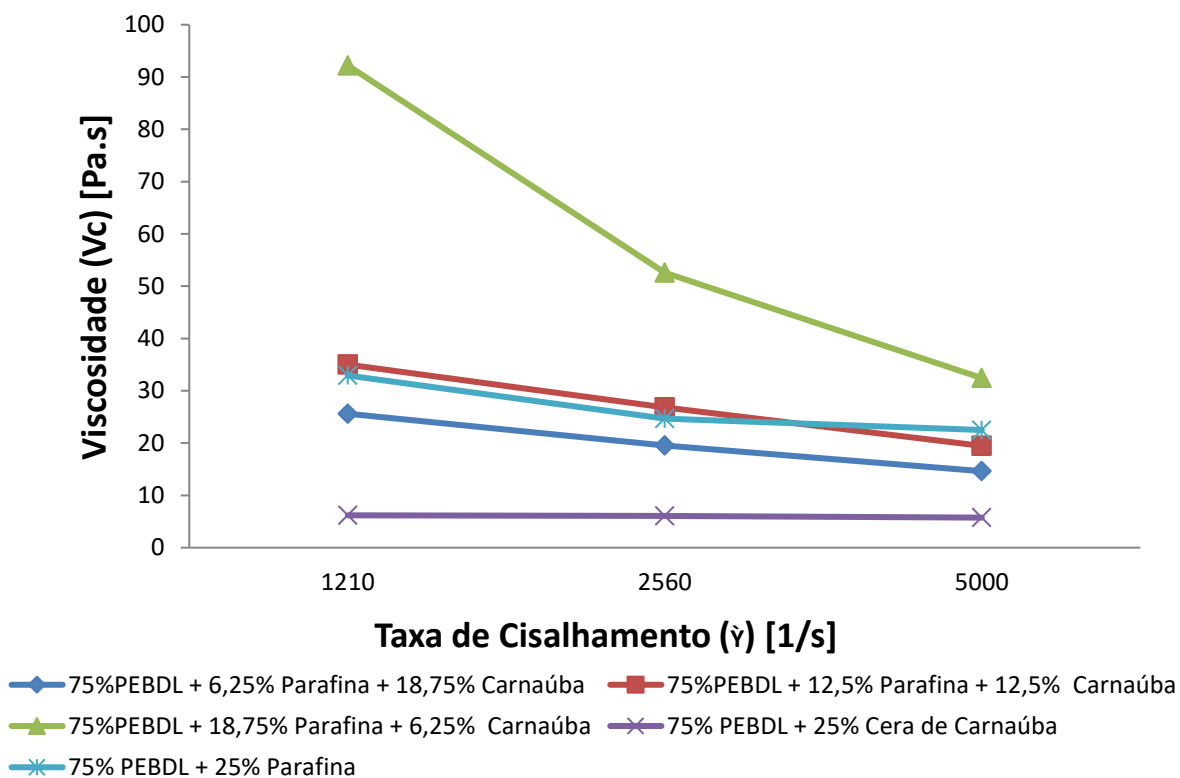


Figura 12: Avaliação reológica do PEBDL com a adição de cera de carnaúba e parafina.

A Figura 12 denota a eficiência da cera de carnaúba em relação a parafina no quesito de diminuir a viscosidade (aumentar índice de fluidez da massa polimérica). Este gráfico juntamente com a Figura 12 indica qual é a melhor cera, que serve como lubrificante para a formulação da carga injetável. Porém, como demonstra a literatura [19], [20], [21], a cera de carnaúba é mais resistente quimicamente e de maior dificuldade de extração com solvente, que prejudica a sua retirada antes da extração térmica. Como diversos autores [31], [32], tiveram dificuldade na injeção de pó nanométrico, optou-se por diminuir a quantidade de polímero estrutural para 50% da proporção da carga injetável do valor usual. Manteve-se o percentual de 25% (12,5% do total do ligante), 50% (25% do total do ligante) e 75% (37,5% do total do ligante). A Figura 13 apresenta o comportamento reológico da adição de parafina no PEBDL, juntamente com a adição de cera de abelha ou a carnaúba para a avaliação final da composição do sistema aglutinante.

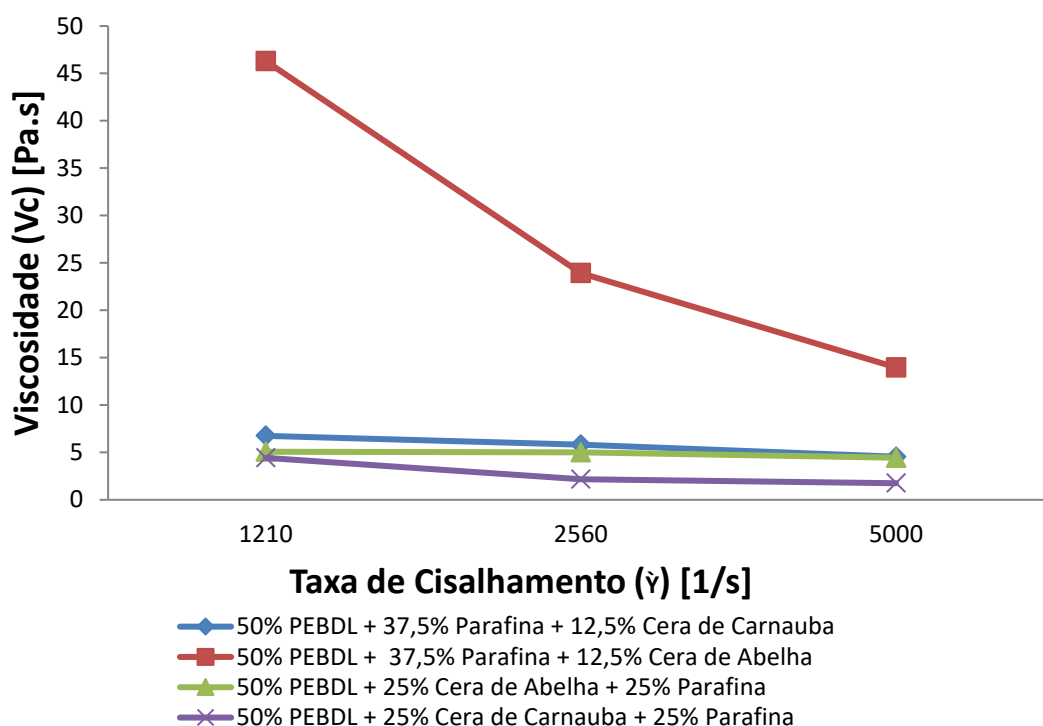


Figura 13: PEBDL com a adição de parafina e cera de carnaúba ou abelha.

Observa-se que a cera de carnaúba é um excelente lubrificante e mesmo com a adição da parafina no PEBDL, a mistura obteve um valor de viscosidade excelente e foi escolhida para fazê-la parte da composição do sistema aglutinante para ser utilizado na carga injetável.

4. CONCLUSÃO

Com os resultados de impressão, nota-se grandes avanços da equipe no entendimento do processo de impressão 3D. Sobre o entendimento do polímero estrutural com as ceras comerciais utilizadas como aglutinante determinou os parâmetros de processamento da blenda polimérica e o comportamento da combinação dos lubrificantes e o polímero estrutural da futura carga injetável, que foram semelhantes ao sistema de aglutinante da carga comercial validando a metodologia aplicada. A blenda polimérica foi determinada por meio da viscosidade e do processamento que obteve o PEBDL como o polímero estrutural e a mistura entre a parafina e cera de carnaúba com lubrificantes. Mas também, permitiu o entendimento da relação entre as ceras e o polímero estrutural expondo que a cera de carnaúba permitia menor viscosidade e

maior molhabilidade, que permitirá melhor adesão aos pós metálicos de aço inoxidável 316L, que posteriormente foi determinante para a impressão das peças com a carga injetável metálica.

Agradecimentos

Os autores agradecem o Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), o Instituto Federal Sul-rio-grandense (IFSul), e à FINEP.

Este artigo é oriundo da pesquisa visculada ao projeto 1161/21 - **Rede de Pesquisa e Desenvolvimento em Tecnologias de Manufatura Aditiva para o Setor Automotivo**, oriundo da chamada pública mcti/finep/programa finep 2030 – rede de ict - 01/2020 - seleção pública de propostas de instituições com o objetivo de formação de redes voltadas à atuação nos segmentos de segurança veicular, proteção ao meio ambiente, eficiência energética e qualidade de veículos automotores terrestres e autopeças - etapa de habilitação – ciclo 3

REFERÊNCIAS

1. ASM Metals Hand Book Volume 7 – Powder Metal Technologies and Applications – 1998.
2. Introduction to Powder Metallurgy, F. Trümmeler & R. Oberacker; The Institute of Materials, 1993, ISBN 0-901716-26-X).
3. ALTUS, Disponível em: <https://www.altus.com.br/post/212/conheca-os-nove-pilares-da-industria-4-0-e-sua-relevancia-para-a-atividade-industrial> Acesso em 14/09/2023
4. POLLUX, Disponível em: <https://pollux.com.br/blog/resumo-sobre-industria-4-0-entenda-rapidamente-os-conceitos-e-beneficios/> Acesso em 14/09/2023
5. PORTAL DA INDÚSTRIA, Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/industria-de-a-z/industria-4-0/> Acesso em 15/09/2023
6. UNLIMITED ESPANHA, Disponível em: <https://www.unltdspain.org/industria-sostenibilidad/> Acesso em 15/09/2023
7. ABM – Associação Brasileira de metalurgia. **Conheça a evolução do desenvolvimento de materiais e sua relação com a sustentabilidade.** Disponível em: <https://www.abmbrasil.com.br/por/noticia/conheca-a-evolucao-do-desenvolvimento-de-materiais-e-sua-relacao-com-a-sustentabilidade> Acesso em 15/09/2023
8. MCTIC – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. **Nanotecnologia.** Disponível em: [https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/tecnologia/tecnologias_convergentes/paginas/nanotecnologia/NANOTECONOLOGIA.html#:~:text=Nanotecnologia%20%C3%A9%20um%20campo%20cient%C3%ADfico,a%201%20bilion%C3%A9simo%20do%20metro\).](https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/tecnologia/tecnologias_convergentes/paginas/nanotecnologia/NANOTECONOLOGIA.html#:~:text=Nanotecnologia%20%C3%A9%20um%20campo%20cient%C3%ADfico,a%201%20bilion%C3%A9simo%20do%20metro).) Acesso em 16/09/2023
9. SANDEROW, H.; Management & Engineering Technologies. Powder Metallurgy Methods and Design. ASM Metals Handbook v7 - Powder Metal Technologies and Applications. ASM International, 9ª Edition. 1998. p.23-24.
10. YVES TRUDEL Introduction to Metal Powder. Production and Characterization ASM Metals Handbook v7 - Powder Metal Technologies and Applications. ASM International, 9ª Edition. 1998. p. 83-88.
11. SENAI - Disponível em: <https://blog.sesisenai.org.br/o-que-e-manufatura-aditiva/> Acesso em 16/09/2023
12. PIMENTA, R., S. **Avaliação da resistência à fadiga em peças impressas através de manufatura aditiva por deposição a arco.** Universidade de Brasília – UNB. Brasília-DF, 11 de maio de 2022.
13. SANDVIK COROMANT - Parte do grupo de engenharia industrial global Sandvik. Um pouco da história da Manufatura Aditiva. Revista Ferramental. Publicado em 09/12/2020.

Disponível em: <https://www.revistaferramental.com.br/artigo/historia-da-manufatura-aditiva/>
Acesso em 15/09/2023

14. 3DSYSTEMS. Disponível em: <https://br.3dsystems.com/selective-laser-sintering> Acesso em 10/09/2023

15. TUDO SOBRE PLASTICO. Disponível em: <https://www.tudosobreplasticos.com/processo/impressao3D.asp> Acesso em 10/09/2023

16. HENS, J.; LEE, D. A. G. R. M. Integrity of complex shape products by powder injection molding. *Powder Metallurgy*, 23, 1991. 15-21.

17. EDIRISINGHE, M. J. The effect of processing additives on the properties of a ceramic-polymer formulation. *Ceramics International*, 17, 1991. 89-96. n° 2.

18. KARATAS, C.; KOCER, A.; ÜNAL, H. I. A. S. S. Rheological properties of feedstock prepared with steatite powder and polyethylene-based thermoplastic binders. *Journal of Materials Processing Technology*, 152, 2004. 77-83.

19. GRISON, E. C.; BECKER, E. J. E. S. A. F. BORRACHAS E SEUS ADITIVOS - Componentes, Influências e Segredos. 1ª. ed. Porto Alegre: suliani - letraevida, 2010. 1 - 226 p. ISBN ISBN: 978-85-60776-53-5.

20. KONG, X.; BARRIERE, T. E. G. J. C. Determination of critical and optimal powder loadings for 316L fine stainless steel feedstocks for micro-powder injection molding. *Journal of Materials Processing Technology*, 30 maio 2012. 1 - 29.

21. NITROGENIUS - PRODUTOS QUÍMICOS. Ficha de informações de segurança de produto químico - fispq - cera de carnaúba. Cera de carnaúba tipo III. Disponível em: <http://www.nitrogenius.com.br/produto.php?pro=61>. Acesso em: 10 de setembro de 2023.

22. OLIVEIRA, R. V. B.; PINHEIRO, E. A.; SOLDI, V. E. P. A. T. N. Moldagem por Injeção de Pós Cerâmicos: Remoção da Parafina e do Polipropileno Utilizados como Veículo Orgânico. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 14, 2004. 150-155.

23. OKUBO, K.; TANAKA, S. E. I. H. Molding technology for improvement on dimensional accuracy in micro metal injection molding. *Microsyst Technol*, 15, April 2009. 887–892.

24. CHENG, L. H.; HWANG, K. S. E. F. Y. L. Molding Properties and Causes of Deterioration of Recycled Powder Injection Molding Feedstock. *Metallurgical and materials transactions*, 40A, DECEMBER 2009. 3210 - 3216.

25. PETROBRAS. Parafina Industrial. Disponível em: http://www.br.com.br/wps/portal/portalconteudo/segmentosdeatuacao/produtosquimicos!/ut/p/c5/04_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3hLf0N_P293QwP3YE9nAyNTD5egIEcnQ4tQA6B8JG55RxOSdPv7e7oC5Q1cXT2MzYHKjQno9tKPSs_JTwK60s8jPzdVP1I_yhzJtLAAoGk-vr6uoQFAroGpfmROanpicqV-QW5. Acesso em: 10 de agosto de 2023.

26. HAUSNEROVA, B. Powder Injection Moulding – An Alternative Processing Method for Automotive Items. In: _____ *New Trends and Developments in Automotive System Engineering*. Czech Republic: InTech, 2011. p. 129 - 146. Capítulo 7.

27. WEN, G. et al. Development and Design of Binder Systems for Titanium Metal Injection Molding: An Overview. *Metallurgical and materials transactions A*, 23 october 2012. 1 - 18.

28. SAMANTA, S. K.; CHATTOPADHYAY, H. E. G. M. M. Thermophysical characterization of binder and feedstock for single and multiphase flow of PIM 316L feedstock. *Journal of Materials Processing Technology*, 211, 2011. 2114– 2122.

29. KERSTNER, E. K. et al. Aspectos reológicos do feedstock para utilização no processo MIM: revisão. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, 6.1, 2011. 21-27.

30. GERMAN, R. M. *Powder Injection Moulding*. Princeton: Metal Powder Industries Federation, 1990. ISBN ISBN 978-0918404954.

31. ZORZI, J. E.; PEROTTONIA, C. A. E. D. J. A. H. A new partially isostatic method for fast debinding of low-pressure. *Materials Letters*, 57, 17 February 2003. 3784–3788.

32. ZORZI, J. E.; PEROTTONIA, C. A. E. D. J. A. H. Moldagem por injeção em baixa pressão de peças complexas de cerâmicas avançadas produzidas com pó submicrométricos. *Cerâmicas*, 50, 2004. 202-208.

DEVELOPMENT OF MATERIALS AND PROCESSES FOR ADDITIVE MANUFACTURING FOR INDUSTRY 4.0

Abstract

Industry 4.0 is revolutionizing society by combining advanced technologies, intelligent automation, and product customization, driving the production of complex and high-performance metal components while redefining industry standards. Powder metallurgy and additive manufacturing represent fundamental innovations in metal parts manufacturing. This article aimed to determine the structural polymer with the best lubricant for use in the printing process. Rheology, DSC/TGA of low-density linear polyethylene as the structural polymer, and paraffin and carnauba wax as suitable lubricants for the 3D printing process were conducted using an FDM printer with injectable metal load for part production. The understanding of the relationship between LDPE and waxes as a binder will form the injectable metal load.

Key words: Industry 4.0; Powder Metallurgy, Waxes, and LDPE.



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil
26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG
25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental
Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

AVALIAÇÃO DO PROCESSO HÍBRIDO DE MANUFATURA ADITIVA DE AÇOS POR FUSÃO LOCALIZADA E FORJAMENTO SUBSEQUENTE

Carlos Antônio Ferreira ⁽¹⁾
Lírio Shaeffer ⁽²⁾
Anderson Daleffe ⁽³⁾
Jovani Castelan ⁽⁴⁾
Daniel Fritzen ⁽⁵⁾
Natan Damian Crozetta ⁽⁶⁾

RESUMO

A manufatura aditiva – MA, é definida como um grupo de tecnologias utilizada na adição de material, camada por camada. Hoje, são mais conhecidas como “impressoras 3D”, surgiu com o objetivo de complementar e até substituir as técnicas já existentes de manufatura. Ainda não existe uma vasta gama de materiais que podem ser processados através dessa tecnologia, porém já é possível processar ligas de titânio, alumínio, níquel, cobalto cromo e aços inoxidáveis. Neste estudo será feito a adição de metal com processo de fusão localizada usando o arco elétrico da máquina de soldagem, onde será fundido o material de adição (arame) para formação de pré-formas para posteriormente ser submetido ao processo de forjamento a quente. O objetivo principal deste trabalho é desenvolver a junção de duas técnicas de manufatura para obter peças manufaturadas pelo processo híbrido, MA e forjamento a quente. Serão fabricados corpos de prova pelo processo de manufatura aditiva no formato de pré-forma e posteriormente forjados a quente em aços de baixa liga com o propósito de caracterizar mecanicamente os dois processos. Ou seja, obter os parâmetros de processo MA e os parâmetros do processo de forjamento a quente de peças fabricadas por MA. Serão realizados ensaios de dureza e metalografia nas peças fabricadas por MA e após o forjamento serão analisadas as peças para estudar o perfil da dureza, metalografia e previsão de rebarba no forjado. Este último poderá ser otimizado pelo processo de MA para obter a menor rebarba possível.

Palavras-chave — Manufatura aditiva, Fusão localizada, Soldagem e Forjamento.

⁽¹⁾ Doutorando, UFRGS, E-mail: carlos.ferreira@satc.edu.br;

⁽²⁾ Prof. Dr. Eng.; UFRGS. E-mail: 00002781@ufrgs.br;

⁽³⁾ Prof. Dr. Eng.; UniSATC. E-mail: anderson.daleffe@satc.edu.br;

⁽⁴⁾ Prof. Dr. Eng.; UniSATC. E-mail: jovani.castelan@satc.edu.br;

⁽⁵⁾ Prof. Dr. Eng.; UniSATC. E-mail: daniel.fritzen@satc.edu.br;

⁽⁶⁾ Graduado; UniSATC. E-mail: natan.crozetta@satc.edu.br

1. INTRODUÇÃO

É inquestionável o uso da manufatura aditiva, (impressão 3D de peças metálicas), devido ao seu sucesso de aplicação frente as mudanças impostas pela indústria 4.0, com a grande competitividade do mercado e a busca por baixos custos produtivos sem perdas de matéria-prima, há elevada necessidade de se utilizar novos métodos nas indústrias.

Nas indústrias metalmeccânica à matéria-prima (metal) passa por algumas etapas de fabricação para alcançar a forma geométrica desejada. Dos processos existentes e que podem ser citados, um trabalha com manufatura subtrativa e outro método que será objeto de estudo do presente trabalho trata da manufatura aditiva.

Atualmente, trabalha-se com o processo de manufatura subtrativa, onde a mesma conta com processos de fabricação por remoção de materiais. Podem ser citados como exemplos a usinagem, estampagem, fundição, laminação, entre outros.

Num contraponto, a manufatura aditiva surgiu por volta do ano de 1981 no Japão com o objetivo de criar peças tridimensionais. Desde então a tecnologia foi avançando e esse método foi ganhando espaço no mercado, com a necessidade da criação de peças complexas que os processos atuais não possam fazer, ou até mesmo na fabricação de protótipos de geometrias e formas complexas, [1].

"O mercado de manufatura aditiva de metal ainda é recente e pequeno, mas é um mercado atraente e com excelente potencial de crescimento. Em 2015, a manufatura aditiva de metal estava apenas começando a ir além de uma ferramenta para prototipagem e P&D para o que hoje podemos chamar de mais uma ferramenta da manufatura. Em 2017, o movimento para se tornar uma tecnologia de produção completa acelerou, por exemplo, nos setores aeroespacial, médico e de ferramentas", [2].

A manufatura aditiva redefine totalmente a abordagem para projetos e sobre o que é possível produzir em uma só peça, e ela também amplia os horizontes e as diversas habilidades envolvidas na área de projetos. Com a real compreensão do que o componente deve fazer, pode-se desenhar a peça com tenacidade e força estrutural exatamente onde forem necessárias, sem as restrições do desenho da manufatura tradicional. Imprimir em 3D um objeto desenhado para usinagem subtrativa simplesmente não propicia essas vantagens, [2].

Este trabalho busca realizar experimentos preliminares para validar conceitos de manufatura aditiva abordados por pesquisadores na eminência de desenvolver e melhorar o novo processo de manufatura. Foi utilizado o arame eletrodo AWS ER 70 S6, arame com característica de aço baixa liga para fabricar as pré-formas e posteriormente forjadas a quente. Os resultados obtidos mostram-se promissores para o desenvolvimento desta modalidade de fabricação de peças metálicas, que nesta pesquisa será abordada como processo de manufatura híbrido, M.A e forjamento a quente.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste estudo foram abordadas duas técnicas de fabricação, a inovadora técnica de manufatura aditiva e o processo já conhecido e muito usado na indústria, o forjamento a quente. Neste capítulo será relatado um breve referencial teórico embasando o leitor nestas duas tecnologias usadas neste trabalho.

2.1. Manufatura Aditiva

A manufatura aditiva vem permitindo, ao longo dos últimos anos, o desenvolvimento, prototipagem e fabricação de peças que antes eram difíceis ou impossíveis pelos métodos tradicionais, com os mais diferentes tipos de materiais. O processo se dá pela deposição progressiva e em camadas do material [4].

A fabricação por manufatura aditiva, atende a diferentes requisitos da indústria 4.0, como a capacidade de customização, eficiência, rapidez de entrega e redução de resíduos, sendo vital para a implementação da quarta revolução industrial. A *American Society of Testing Materials – ASTM* e a

International Organisation for Standardization – ISO se juntaram em 2015 e publicaram a norma ISO/ASTM 52900:2015 definindo sete processos primários de manufatura aditiva: jateamento de material, extrusão de material, fusão em leito de pó, jateamento de aglutinante, fotopolimerização em cuba, adição de lâminas, e por último o foco desse estudo: o processo de deposição com energia direcionada (DED) [3].

O processo de fabricação MADA (ou wire arc additive manufacturing – WAAM) é um processo do tipo Directed Energy Deposition (DED) e pode ser utilizado pelos processos: Gas Metal Arc Welding (GMAW) e Gas Tungsten Arc Welding (GTAW). Ambos utilizam o arco elétrico como fonte de calor e proteção gasosa. No entanto, GMAW utiliza eletrodo consumível, o qual é aquecido por efeito Joule, que funde a ponta do eletrodo e inicia a transferência metálica através de gotas metálicas em estado líquido [5].

2.3. Processo de Forjamento a Quente

A diversidade de aplicações dos produtos fabricados pelo processo de forjamento é atribuída a importante relação obtida entre a qualidade dos produtos e os custos de produção, entretanto, o custo do ferramental neste processo é expressivamente dispendioso. Estudos que envolvem a fabricação e manutenção das matrizes, em particular, a investigação das maneiras que gerem aumento do desempenho e da vida útil são de relevância acadêmica e fabril, [6].

Atualmente, a rota de fabricação das matrizes com auxílio da utilização de softwares, os projetistas definem a cavidade da matriz baseados no modelo CAD desenvolvido. Os softwares utilizados possuem recursos para desenvolver a matriz, figura 1, de forma rápida, mesmo em casos de peças com geometria complexa. O projeto final da matriz é transferido para a engenharia de processo, a qual fica encarregada da fabricação da matriz. A grande vantagem trazida pelos softwares é que todo este processo é feito de forma integrada. O modelo CAD é aberto em um software de CAM e este gera estratégias de usinagem, as quais serão responsáveis pela remoção do material até chegar à forma final da matriz.

A utilização desta tecnologia é crucial para o desenvolvimento de uma matriz que atenda aos requisitos de qualidade e de um processo economicamente viável, [7].



Figure 1: Parâmetros que afetam a vida de uma ferramenta [10].

A linha de separação, também denominada linha de aparte ou linha de partição, corresponde ao contorno de fechamento da matriz superior e inferior. A forma e colocação da linha de separação são determinantes no custo final das matrizes, nos ângulos de saída, nas linhas de fluxo e na definição e concepção de projeto de apartamento de rebarba [11].

Segundo (SHAEFFER, 2004), [12], a escolha e o posicionamento correto desta linha podem influenciar diversos fatores do projeto, tais como:

- ✓ Facilidade de fechamento das matrizes e extração das peças;
- ✓ Preenchimento da cavidade;

- ✓ Formação de defeitos e dobras;
- ✓ Quantidade de material perdido em rebarba;
- ✓ Extensão e detecção de desalinhamentos;
- ✓ Posicionamento da geratriz na matriz;
- ✓ Tolerâncias das peças forjadas.

Para geometrias simples e simétricas esta linha é reta e situa-se no centro geométrico da peça, já em geometrias mais complexas a linha pode ser curva e irregular em relação ao plano de forjamento, [11].

Em função do fluxo de material, a Figura 2 mostra a influência da linha de separação em combinação com a linha de rebarba. Observa-se que o posicionamento da linha de separação tem influência direta nas linhas de fluxo da peça

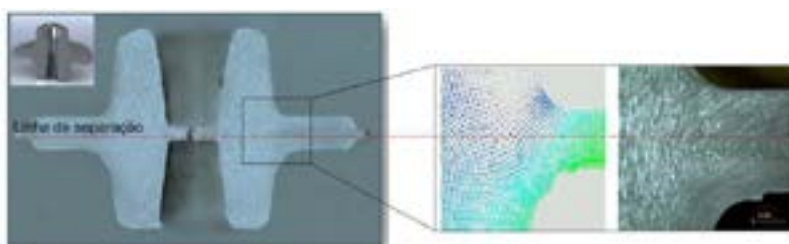


Figure 2: Efeito da linha de separação no fluxo do material e comparação das linhas de fluxo obtidas a partir de software de simulação por elementos finitos [13].

2.4 Metalografia

O conhecimento das características de materiais é essencial para garantir a conformidade de determinados produtos. A partir disso, pode-se observar aspectos como a microestrutura, formação de poros, possíveis defeitos e presença de zonas afetadas por tratamentos térmicos ou procedimentos de solda [14]. Pode-se dividir um ensaio metalográfico em dois subgrupos: macrográfico e micrográfico.

2.5 Aço Carbono SAE 1020

O aço SAE 1020 é um dos aços ao carbono mais comumente utilizado pois possui excelente relação custo-benefício comparado com aços liga. Possui excelente conformabilidade e soldabilidade, usinabilidade e amplamente encontrado no mercado [15].

2.5.1 Composição Química e Metalografia do Aço SAE 1020

A composição química do aço SAE 1020 em seu estado de fornecimentos contem carbono, enxofre, manganês e fósforo na porcentagem em peso de acordo com a tabela 1.

Tabela 1: Composição química Aço SAE 1020 [9]

Composição química	Valores %
Carbono (C)	0,18 – 0,23
Enxofre (S) Máx.	0,05
Manganês (Mn)	0,30 – 0,60
Fósforo (P) Máx.	0,04

A Figura 3 apresenta a metalografia do aço SAE 1020 em seu estado de fornecimento. Repare-se a microestrutura granular do aço sem tratamento térmico e seus microconstituintes com grãos de ferrita (α) de contorno de grão (fase clara) e grãos de perlita (fase escura) [10].

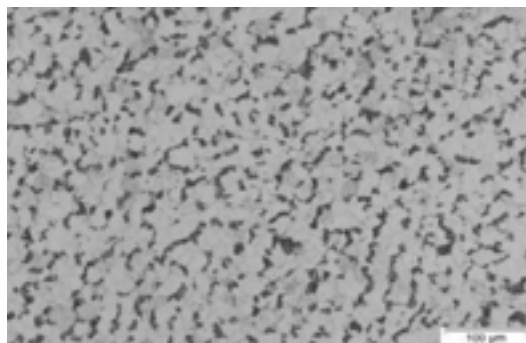


Figure 3: Metalografia do aço SAE 1020 em seu estado de fornecimento [10].

2.6.2 Propriedades Mecânicas aço SAE 1020

As propriedades mecânicas mostradas na Tabela 2 visam ressaltar as características do aço SAE 1020, tais quais podem impactar na temperabilidade, na usinabilidade e na soldabilidade do aço. Esses impactos podem ser causados devido a elevada dureza do material se comprado com outros aços da mesma classe, também pode ser relacionado as alterações microestruturais.

Tabela 2: Propriedades Mecânicas Aço SAE 1020 [16]

Propriedades	Valores
Densidade (g/cm ³)	7,87
Limite de escoamento (Mpa)	350
Resistência a tração (Mpa)	420
Módulo de elasticidade (GPa)	205
Dureza Vickers (HV)	126

3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Foram realizados experimentos preliminares para validação das estratégias de deposição de material na M.A., (máquina CNC adaptada e máquina de soldagem integrada), com o objetivo de avaliar a melhor forma de deposição. Atrrelado a um estudo preliminar no formato da peça a ser impressa em metal de acordo com o formato da matriz de forjamento.

3.1. Experimento preliminar

Para desenvolver a programação de controle do equipamento de soldagem automática, foram realizados testes na matriz de forjamento da ferradura utilizando massa de modelar a base de amido para estipular a forma, percurso e dimensão das peças para manufatura aditiva, conforme Figura 4.



Figure 4: Análise da Peça na Matriz de Forjamento

Quatro corpos de provas foram feitos para os testes, tabela 3. O metal de adição utilizado foi um aço de baixo carbono (0,2%) com gás utilizado segundo o sistema de classificação AWS A5.32 foi SG-AC-25 – Argônio + CO₂, e para a confecção das peças foram necessárias 6 camadas/passos de deposição.

Tabela 3: Parâmetros utilizados na fabricação dos corpos de prova

Amostras	Arame	Nº de Camadas
01	ER 70 S-6	06
02	ER 70 S-6	06
03	ER 70 S-6	06
04	ER 70 S-6	06

3.2 Programação CNC Para Deposição das Camadas

Através de testes preliminares foi criada a programação utilizando o software Mach3, tendo como parâmetro a velocidade de soldagem de 400mm/min, sendo que a cada passe foi programado um aumento de 3mm no eixo Z, assim a distância bico contato peça permaneceu constante. A Figura 5 mostra a visão geral da tela de programação da máquina de M.A., usadas nos ensaios.

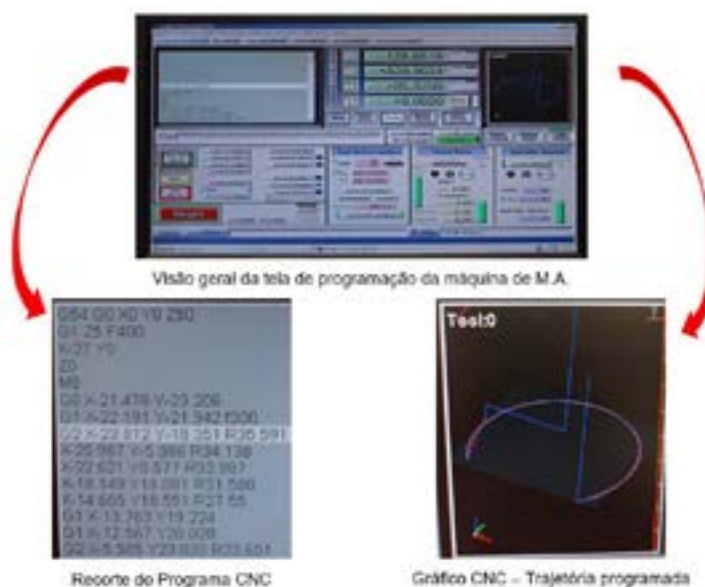


Figure 5: Visão geral da tela de programação com ampliação do programa e trajetória CNC para deposição de uma camada. Fonte: do autor (2023).

Para fabricação dos corpos de prova foi realizado um total de 6 camadas, sendo que após os primeiros passes houve uma inversão de sentido de deposição para correção da geometria dos cordões principalmente no início da abertura do arco elétrico para manter uma altura uniforme ao longo do percurso e de cada camada.

3.3 Parâmetros Utilizados

A Tabela 4, apresenta os parâmetros individuais utilizados na máquina de solda. Os valores foram definidos mediante testes, avaliando a geometria do cordão e taxa de deposição.

Com essa configuração a transferência de metal foi utilizado método por Spray, onde a tensão máxima indicada é de 22V e velocidade de alimentação do arame menor de 60m/min.

Tabela 4: Parâmetros utilizados na máquina de soldagem

Parâmetros	Valores
Tensão (V)	21
Corrente (A)	200
Velocidade alimentação do arame (m/min)	8,1
Vazão gás de proteção (l/min)	14
Taxa de deposição (Kg/h)	2,7

3.4 Corpos de Prova Fabricados por M.A.

Corpos de prova fabricados por M.A no formato aproximado de ferradura, conforme figura 6. Para deposição das camadas foi utilizado arame AWS A5.18 ER70S 6 e o arco elétrico para fornecimento de energia para poça de fusão foi gerado através da máquina de soldagem modelo SMASHWELD 250E e o gás de proteção usado foi o argônio com 75% e CO₂ 25%.



Figure 6: Peças manufaturadas para forjamento. Fonte: do autor (2023).

Na prensa hidráulica FKL modelo PHR150 é alinhada e fixada na matriz de forjamento. Para que a peça não fique presa a matriz após o forjamento, deve-se aplicar um lubrificante de grafite em sua superfície.

As amostras 01, 02, 03 e 04 são aquecidas no forno Mufla JUNG modelo LF2314 a 1200°C, e depois são retiradas e imediatamente levadas sobre a matriz, conforme figura 4. A prensa hidráulica é configurada com os parâmetros de 100ton de força de fechamento e 9 ton de força de abertura.

3.6 Ensaio de Microdureza Vickers

Para realização do ensaio utilizou-se um microdurômetro modelo HMV-2TADW da marca SHIMADZE® seguindo a norma ABNT NBR ISO 6507. O ensaio foi realizado em um corpo de prova aplicando uma força de 4,903N e uma distância de 1mm a cada endentação, conforme Tabela 5.

Tabela 5: Número de Endentações

Parâmetros	CP01
Total de identações (transversal)	8
Total de identações (longitudinal)	9

3.7 ANÁLISE METALOGRÁFICA

O ensaio metalográfico foi realizado seguindo a norma ABNT NBR 15454, que define os termos empregados em metalografia das ligas ferro-carbono, utilizando um microscópio Olympus modelo SC30.

4. RESULTADOS E DISCUÇÕES

Buscando o propósito de validação do processo de fabricação híbrido (M.A. e forjamento a quente subsequente), através do método de deposição camada por camada GMAW com arame e fusão localizada na poça de fusão, será apresentado e tratado os resultados obtidos ao longo deste estudo.

4.1 Ensaio de Microdureza Vickers

Os resultados obtidos ao longo do perfil de cada corpo de prova, seja no sentido longitudinal e transversal são apresentados conforme gráfico figura 7 e 8. Sendo que no gráfico figura 7 os resultados mostram os detalhes do material impresso e no gráfico figura 8 são mostrados os resultados dos corpos de prova após o forjamento.

A Figura 7, mostra o comportamento da dureza Vickers no sentido longitudinal ao longo de todo o perfil do corpo de prova (pré-forma da ferradura) fabricada pelo processo de manufatura aditiva, onde a dureza média ficou em 195 HV.



Figura 7: Comportamento Dureza (HV) sentido longitudinal e transversal em relação as camadas depositadas. Fonte: do autor (2023).

A figura 8, mostra os dados da dureza coletados na amostra após o processo de manufatura aditiva e posterior forjamento a quente, onde a dureza média é de 180 HV. Percebe-se uma homogeneidade da dureza ao longo do perfil da peça, característica está, que demonstra a mudança ocorrida durante o reaquecimento da peça (pré-forma da ferradura fabricada por M.A.), para o processo de forjamento a quente.



Figura 8: Comportamento Dureza (HV) sentido longitudinal e transversal nas peças impressas e forjadas. Fonte: do autor (2023).

4.3. Ensaio de Metalografia

Analisando a microestrutura das amostras soldadas observa-se uma microestrutura com a maioria de grãos de ferrita pró-eutetóide (partes brancas) com algumas colônias de perlita (partes escuras). Avaliando as camadas de deposição de solda fica evidente que existe uma diferença na morfologia dos grãos ao longo das deposições, conforme figura 9.



Figura 9: Metalografia dos corpos de provas após manufatura aditiva. Fonte: do autor (2023).

As primeiras camadas possuem uma microestrutura mais homogênea, com grãos equiaxiais. As camadas mais superficiais possuem grãos mais alongados e com um certo direcionamento. Isto se deve ao fato de as primeiras camadas serem continuamente aquecidas pelas camadas subseqüentes, fornecendo energia e tempo necessários para que haja uma recuperação do material. As camadas superiores sofrem um resfriamento mais rápido, onde a ferrita se torna colunar e cria um direcionamento no sentido do resfriamento. Além disso, também é possível observar alguns pontos que aparentam ser inclusões de escória.

Nas amostras forjadas, observa-se que a microestrutura se tornou homogênea e com grãos equiaxiais ao longo das camadas, bem como um refino dos grãos. Como o forjamento foi realizado a 1200°C, acima da temperatura de austenitização, era esperado que houvesse a homogeneização da microestrutura, porém o forjamento influenciou no refino dos grãos, conforme figura 10. Para isto, deveria ter sido realizado um teste apenas aquecendo o material e retirando do forno sem forjar.

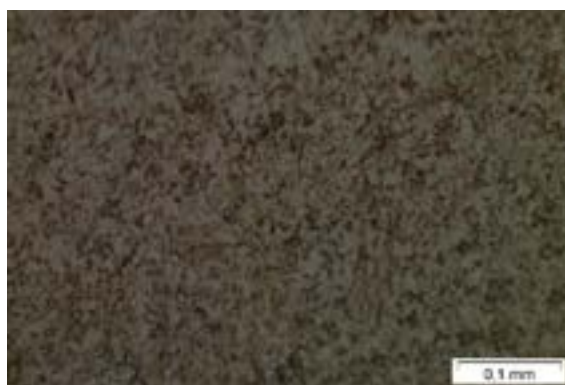


Figura 10: Amostra Soldada e Forjada –Análise Metalográfica - Ampliação 200X. Fonte: do autor (2023).

Outro fato observado foi a presença de falhas mais evidentes (partes escuras maiores), causadas pelas inclusões observadas nas amostras soldadas que se uniram devido ao forjamento.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho mostrou-se de forma eficiente a confecção de peças unindo o processo de manufatura aditiva e forjamento a quente. As amostras produzidas neste trabalho tiveram uma formação de camadas homogêneas durante a impressão 3D metálica (manufatura aditiva), o que prova que a técnica é viável para produção de peças em metal.

As pré-formas fabricadas por M.A. e forjadas posteriormente apresentaram uma estrutura homogênea e com pouca formação de rebarba de forjamento, isso se deve ao fato que na fabricação da pré-forma é possível calcular as trajetórias do CNC para fabricar a peça próxima das dimensões finais da peça.

Analisando o perfil de dureza traçado, foi possível identificar que nas amostras fabricadas por M.A. ou seja, as pré-formas, a dureza teve variação ao longo do perfil tendo pequeno aumento da dureza nas extremidades, isso por conta do resfriamento mais rápido do que as camadas abaixo que sofreram o reaquecimento a cada camada depositada, proporcionado desta forma tempo para refino dos grão.

Em relação a metalografia foi possível perceber que comparando as amostras coletadas nas pré-formas (fabricadas por M.A) e nas peças após o forjamento houve o refino dos grão da microestrutura das peças após o forjamento, isso porque durante o forjamento foi feito o aquecimento das pré-formas no forno a 1200 °C proporcionando a condição de refino dos grão, além do forjamento que também muda a microestrutura. Em um trabalho futuro recomenda-se fazer a análise das peças aquecidas para forjamento e após o forjamento, para entender melhor, onde e como aconteceu o refino dos grãos.

De acordo com os resultados apresentados na análise metalográfica, as amostras obtiveram melhoras no material após o forjamento, porém apresentaram inclusões. Para uma peça com melhor acabamento recomenda-se utilizar mais camadas de deposição e realizar novos testes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Universitário – UNISATC pelo apoio a pesquisa através do uso de sua estrutura de laboratórios, a Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS pelo apoio através do acesso a rede de pesquisadores, e a Fundação de Amparo a Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina – FAPESC pelo apoio financeiro na compra de equipamentos e insumos para pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] CODAMA, H., 'Usinagem Brasil'. São Paulo, 2018. Disponível em: <<http://www.usinagem-brasil.com.br/13122-um-pouco-da-história-da-manufatura-aditiva/pa-5/>> Acesso em: 14 agosto 2023.
- [2] SANDVIK, "Redefinindo o projeto com a manufatura aditiva". Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/mwww/redefining-design-with-additive-manufacturing>. Acesso em: 21 agosto 2023.
- [3] OLIVEIRA, R.P. A influência do reaquecimento de camadas na microestrutura e na dureza de produtos de aço fabricados com manufatura aditiva por deposição a arco (MADA), comparando dois tipos de resfriamento: a ar e a água. Diss. de Mestrado. Mestrado Profissional em Engenharia da Produção, UFAM, 2022.
- [4] ALCALDE, E.; WILTGEN, F., Estudo das tecnologias em prototipagem rápida: passado, presente e futuro, Revista de Ciências Exatas da Universidade de Taubaté. Universidade de Taubaté (UNITAU), 2018.
- [5] MACHADO, I.G. Soldagem e técnicas conexas: processos. Porto Alegre: editado pelo autor, 1996. 477p.
- [6] COSTA, Luana De Lucca de; Marques, Angela Selau; Schaeffer Lirio. Fatores de Influência no Projeto de matriz para forjamento a quente. Contribuição técnica ao 70º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 15º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, parte integrante daABM Week, realizada de 17 a 21 de agosto de 2015, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [7] MAWUSSI, K. B; TAPIE, L. A knowledge base model for complex forging die machining. Computers & Industrial Engineering. 2011; pp. 84-97.
- [8] Catálogo de Arames de Aço Carbono. Tenax, Rio de Janeiro, 2023.
- [9] COSTA, T.B.; ÁLVARO, J. L.; BALESTRA, R.M. Influência do tempo de cementação no aço SAE 1020. 8º Congresso de Engenharias da UFSJ, São João Del-Rei, 2018.
- [10] BRUCELLE, O; BERNHAT, G. Methodology for service life increase of hot forging tools. Journal of Materials Processing Technology. 1999; Vol 87, pp. 237–246.
- [11] RODRIGUES, J; MARTINS, P. Tecnologia Mecânica – Tecnologia da Deformação Plástica, Vol II. Lisboa: Escobar Editora, 2005.
- [12] SCHAEFFER, L. Conformação Mecânica. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.
- [13] MARQUES, A. S. Estudo do forjamento de peças vazadas a partir de geratriz tubular. Dissertação de mestrado. PPGE3M – UFRGS, 2013.
- [14] Análise de metalografia. LabTeste Laboratório Metalúrgico, Santa Bárbara d'Oeste, 2023.
- [15] LUZ, G. Aço SAE 1020 Propriedades (e Fornecedores do Aço 1020). Blog Materiais, 2017.
- [16] LUZ, G. Aço SAE 1020 Propriedades (Mec, Qui e Lista de Fornecedores do Aço 1020). Blog Materiais, 2023.



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil
26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA COM DEPOSIÇÃO LOCALIZADA ATRAVÉS DA TECNOLOGIA GMAW DUPLO ARAME

Denis Kohler Dagostim ⁽¹⁾

Anderson Daleffe ⁽²⁾

Daniel Fritzen ⁽³⁾

Gilson de March ⁽⁴⁾

Aline Cipriano ⁽⁵⁾

RESUMO

O processo de soldagem gas-metal arc welding (GMAW) duplo arame desponta no mercado como uma alternativa importante quando se deseja aumento de produtividade. Neste estudo, para aplicação do processo de manufatura aditiva por deposição a arco, que ganhou notoriedade com a indústria 4,0, essa variante do processo de solda GMAW foi aplicado na configuração duplo arame em uma única poça de fusão e potenciais isolados, arame AWS A5.18 ER70S-6 de 1,0 mm de diâmetro, e um cilindro de gás de proteção SG-AC-25. A parte experimental foi realizada no laboratório de tecnologia de soldagem da UNISATC, onde toda a estrutura automatizada foi desenvolvida no próprio centro acadêmico da instituição. Parâmetros foram variados apenas o necessário para alcançar um processo de soldagem estável. Além disso, geometria do cordão de solda, ensaios de dureza, composição química e determinação de microestrutura foram incluídos da parte experimental. A importância dos resultados obtidos é vital como fonte de pesquisa para o aprimoramento do processo de manufatura aditiva com fusão localizada associado ao processo industrial de soldagem almejando alcançar diferentes aplicações com grande eficiência.

Palavras-chave — GMAW duplo arame, manufatura aditiva, produtividade, fusão localizada.

⁽¹⁾ Mestrando Profissional em Engenharia Metalúrgica, Centro Universitário UniSATC, E-mail: denisdagostim@gmail.com;

⁽²⁾ Prof. Dr. Eng.; Centro Universitário UniSATC. E-mail: anderson.daleffe@satc.edu.br;

⁽³⁾ Prof. Dr. Eng.; Centro Universitário UniSATC. E-mail: daniel.fritzen@satc.edu.br;

⁽⁴⁾ Prof. Graduado; Centro Universitário UniSATC. E-mail: gilson.march@satc.edu.br;

⁽⁵⁾ Prof. Mestre; Centro Universitário UniSATC. E-mail: aline.cipriano@satc.edu.br

1. INTRODUÇÃO

As indústrias metalmeccânica tem como um dos principais objetivos a busca de maior produtividade atrelada com qualidade e menor custo de fabricação. Nesse aspecto, na área de soldagem tem sido utilizados vários processos de solda que possibilitam executar projetos com extrema eficiência, entre eles o processo de soldagem GMAW duplo arame, que consiste na formação de dois arcos elétricos entre a peça e dois eletrodos alimentados continuamente e protegidos por um fluxo de gás.

Na indústria metalmeccânica a matéria-prima passa por processo de fabricação conhecidos como manufatura subtrativa, onde a mesma conta com processos de remoção de materiais. Num contraponto, a manufatura aditiva por deposição a arco (MADA), que é um processo de fabricação no qual o arco elétrico é utilizado com fonte de calor e o material é depositado camada por camada para obtenção de componentes de média e alta complexidade.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Manufatura Aditiva

A manufatura aditiva cumpre diferentes requisitos da indústria 4.0, como a capacidade de customização, eficiência, rapidez de entrega e redução de resíduos, sendo vital para a implementação desta quarta revolução industrial. A *American Society of Testing Materials – ASTM* e a *International Organisation for Standardization – ISO* se juntaram em 2015 e publicaram a norma ISO/ASTM 52900:2015 definindo sete processos primários de manufatura aditiva: jateamento de material, extrusão de material, fusão em leito de pó, jateamento de aglutinante, fotopolimerização em cuba, adição de lâminas, e por último o foco desse estudo: o processo de deposição com energia direcionada (DED) [1].

2.2. Relação da Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) com soldagem GMAW

O processo de fabricação MADA (ou *wire arc additive manufacturing – WAAM*) é um processo do tipo *Directed Energy Deposition* (DED) e pode ser utilizado pelos processos: *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) e *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW). Ambos utilizam o arco elétrico como fonte de calor e proteção gasosa. No entanto, GMAW utiliza eletrodo consumível, o qual é aquecido por efeito Joule, que funde a ponta do eletrodo e inicia a transferência metálica através de gotas metálicas em estado líquido [2].

2.3. Processo GMAW duplo arame

Neste processo, há uma complexa interação entre forças, que são influenciadas pelos parâmetros de soldagem e resultam em três principais tipos de modo de transferência: curto-circuito, globular e goticular, modos os quais são diretamente proporcionais a quantidade de energia utilizada, indo do curto-circuito, onde a energia utilizada no processo é menor, até goticular, o qual é obtido com maiores correntes de soldagem, resultando em um processo com maior aporte térmico [2].

A energização dos dois arames-eletrodos pode ser feita por uma única fonte ou (duas interligadas em paralelo) ou por duas fontes independentes, o que caracteriza o processo como potencial único (DAPU) ou potencial isolado (DAPI), respectivamente. Como duas fontes podem opcionalmente ser usadas para comandar os dois alimentadores, diferentes parâmetros elétricos podem ser impostos sobre cada arame. Também pode-se variar a disposição (posicionamento) relativa das pontas dos arames em relação à peça, ou seja, disposição em paralelo ou em série conforme Figura 1. [4].

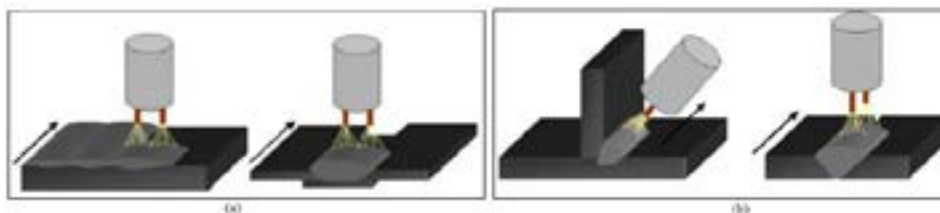


Figura 1: (a) disposição paralelo; (b) disposição em série [5].

2.3.1. Ângulo da tocha

O ângulo de ataque do fio, ou seja, o ângulo formado entre o eixo de simetria do fio em relação a superfície a ser soldada, e o ângulo de arraste que é o ângulo formado entre a tocha de solda e o sentido de deslocamento da linha de solda. O que se tenta evitar, controlando estas variáveis, é que o banho de fusão e a escória líquida ultrapassem a frente do arco elétrico, de forma a evitar inclusões de escória, porosidades, diminuição da penetração e morfologia do cordão irregular [6].

2.4 METALOGRAFIA

O conhecimento das características de materiais é essencial para garantir a conformidade de determinados produtos. A partir disso, pode-se observar aspectos como a microestrutura, formação de poros, possíveis defeitos e presença de zonas afetadas por tratamentos térmicos ou procedimentos de solda [7]. Pode-se dividir um ensaio metalográfico em dois subgrupos: macrográfico e micrográfico.

2.5 AÇO CARBONO SAE 1020

O aço SAE 1020 é um dos aços ao carbono mais comumente utilizado pois possui excelente relação custo-benefício comparado com aços liga. Possui excelente conformabilidade e soldabilidade, usinabilidade e amplamente encontrado no mercado [8].

2.5.1 Caracterização Metalográfica Aço SAE 1020

Com aumento de 200 X, a Figura 2 apresenta a metalografia do aço SAE 1020 em seu estado de fornecimento. Repare-se a microestrutura granular do aço sem tratamento térmico e seus microconstituintes com grãos de ferrita (α) de contorno de grão (fase clara) e grãos de perlita (fase escura) [9].

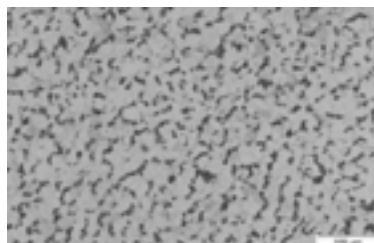


Figura 2: Metalografia do aço SAE 1020 em seu estado de fornecimento [9].

2.5.2 Composição Química Aço SAE 1020

A Tabela 1, apresenta a composição química do aço carbono SAE 1020 em % em peso.

Tabela 1: Composição química Aço SAE 1020 [10]

Composição química	Valores %
--------------------	-----------

Carbono (C)	0,18 – 0,23
Enxofre (S) Máx.	0,05
Manganês (Mn)	0,30 – 0,60
Fósforo (P) Máx.	0,04

2.6 ENSAIO DE DUREZA

Na área da mecânica, considera-se dureza como a resistência a deformação plástica (permanente) localizada (pequena impressão ou risco), isso porque uma grande parte da metalurgia consiste em deformar plasticamente os metais. Já em relação a área da mecânica, dureza é a resistência a penetração de um material duro no outro, pois esta é uma característica que pode ser facilmente medida [11].

2.6.1 Ensaio de Dureza Vickers

O ensaio de dureza Vickers foi desenvolvido em 1925 por Smith e Sandland, se baseia na resistência que o material oferece a penetração de uma pirâmide de diamante de base quadrada e ângulo entre faces de 136°, submetida a determinada carga. O valor de dureza Vickers (HV) é o quociente da carga aplicada pela área de impressão deixada no corpo ensaiado [12].

2.6.2 Propriedades Mecânicas aço SAE 1020

As propriedades mecânicas mostradas na Tabela 2 visam ressaltar as características do aço SAE 1020, tais quais podem impactar na temperabilidade, na usinabilidade e na soldabilidade do aço. Esses impactos podem ser causados devido a elevada dureza do material se comprado com outros aços da mesma classe, também pode ser relacionado as alterações microestruturais.

Tabela 2: Propriedades Mecânicas Aço SAE 1020 [13]

Propriedades	Valores
Densidade (g/cm ³)	7,87
Limite de escoamento (Mpa)	350
Resistência a tração (Mpa)	420
Módulo de elasticidade (GPa)	205
Dureza Vickers (HV)	126

3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

A abordagem do presente trabalho é experimental. A seguir é feita uma descrição detalhada sobre os procedimentos visando facilitar o entendimento acerca dos resultados obtidos, bem como uma eventual reprodução do experimento.

3.1. EQUIPAMENTOS PARA MANUFATURA POR FUSÃO LOCALIZADA

Para o estudo foi utilizado simultaneamente duas máquinas de soldagem: (a) SMASHWELD 250E semiautomática, da marca ESAB, (b) máquina modelo VI 320 da marca White Martins.

A máquina de manufatura aditiva utilizada, executa movimentos em três eixos, incluindo o controle das tochas que é a responsável por fazer a deposição do material camada por camada, sendo possível ter um derramamento de material uniforme.

Para fixação das tochas foi desenvolvido um dispositivo próprio para a execução do experimento, conforme Figura 3, onde pode-se regular individualmente a distância entre eletrodos no bico de contato (23mm), distância bico contato peça (24,5mm) e o ângulo das tochas (62°). Nessa configuração a distância entre arame em relação a poça de fusão é nula, ou seja, os dois arames tocam a poça de

fusão simultaneamente no mesmo local.



Figura 3: Dispositivo de fixação das tochas. Fonte: do autor (2023).

3.2. ARAME AWS A5.18 ER70S-6

O material utilizado para o estudo no processo GMAW duplo arame foi o arame de 1mm de diâmetro, de especificação AWS A5.18 que é utilizada para classificações de eletrodos ou compostos na soldagem de aço carbono.

A classificação AWS 5.18 ER70S-6, a qual acompanha o padrão ER XX Y-X, o qual o termo ER designa eletrodo na forma de arame ou vareta, “XX” diz respeito ao limite de ruptura no ensaio de tração em Ksi, “X” designa a faixa de composição química e “Y” se refere se o eletrodo é sólido ou composto. Dessa forma, a composição química do arame utilizado é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3: Composição química do arame AWS A5.18 ER70S-6 [3]

Classificação AWS	Valores %
Carbono (C)	0,07 – 0,15
Silício (Si)	0,80 – 1,15
Manganês (Mn)	1,40 – 1,85
Enxofre (S)	0,025
Cobre (Cu)	0,50
Fósforo (P)	0,035

3.3. GÁS DE PROTEÇÃO

As propriedades dos gases de proteção afetam o desempenho de todos os processos de soldagem arco elétrico. O potencial de ionização é uma das principais propriedades dos gases de proteção influenciando a abertura e estabilidade do arco elétrico.

A seleção do gás utilizado neste experimento segundo o sistema de classificação AWS A5.32 foi SG-AC-25 – Argônio + CO₂ levando em consideração alguns fatores como: modo de transferência do metal de adição, velocidade de soldagem, propriedades mecânicas.

3.4 ESTRATÉGIA DE DEPOSIÇÃO

Através de testes preliminares foi criada a programação utilizando o software Mach3, tendo como parâmetro a velocidade de soldagem de 350mm/min, sendo que a cada passe foi programado um aumento de 3mm no eixo Z, assim a distância bico contato peça permaneceu constante. A Figura 4 mostra a deposição sem tecimento dos dois arames.

Para realização dos corpos de prova foi realizado um total de 12 camadas, sendo que após 5 passes houve uma inversão de sentido de deposição para correção da geometria dos cordões

principalmente no início da abertura do arco para manter uma altura uniforme ao longo do percurso.

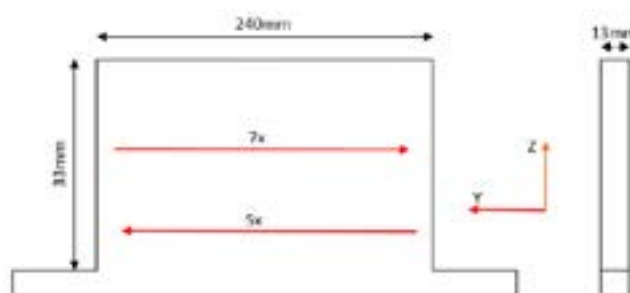


Figura 4: Estratégia de deposição sem tecimento. Fonte: do autor (2023).

3.5 PARÂMETROS UTILIZADOS

A Tabela 4, apresenta os parâmetros individuais utilizados em cada máquina de solda. Os valores foram definidos mediante testes, avaliando a geometria do cordão e taxa de deposição.

Com essa configuração a transferência de metal foi utilizado método por Spray, onde a tensão máxima indicada é de 22V e velocidade de alimentação do arame menor de 60m/min.

Tabela 4: Parâmetros utilizados em cada máquina

Parâmetros	Máquina de solda (a)	Máquina de solda (b)
	Valores	Valores
Tensão (V)	20	22
Corrente (A)	195	90
Velocidade alimentação do arame (m/min)	7,1	3,2
Vazão gás de proteção (l/min)	14	14
Taxa de deposição (Kg/h)	2,5	1,15

3.6 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

Durante esse ensaio utilizou-se um microdurômetro modelo HMV-2TADW da marca SHIMADZE® seguindo a norma ABNT NBR ISO 6507. O ensaio foi realizado em três corpos de prova aplicando uma força de 4,903N, conforme Tabela 5.

Tabela 5: Número de Endentações

Parâmetros	CP01	CP02	CP03
Total de endentações (horizontal)	21	12	12
Total de endentações (vertical)	29	27	30

A Figura 5, mostra com detalhes as endentações realizadas nos três corpos de prova no sentido vertical com 0,5mm entre cada endentação e horizontal com 1,0mm entre cada endentação para obtenção do ensaio de dureza Vickers.



Figura 5: Sentido vertical e horizontal de aplicação do ensaio. Fonte: do autor (2023).

3.7 ANÁLISE METALGRÁFICA

O ensaio metalográfico foi realizado seguindo a norma ABNT NBR 15454, que define os termos empregados em metalografia das ligas ferro-carbono, utilizando um microscópio Olympus modelo SC30.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o propósito de validação do processo de fabricação MADA através do método GMAW duplo arame em uma única poça de fusão, será apresentado e tratados os resultados obtidos ao longo deste estudo.

4.1 Caracterização dos Cordões

Foram feitas três amostras conforme Figura 6, onde é perceptível a deposição das camadas e homogeneidade das mesmas.



Figura 6: Amostras impressas por MADA. Fonte: do autor (2023).

A Tabela 6, mostra aspectos geométricos de cada amostra. Após execução da primeira camada, foi projetado adicionar 11 camadas com acréscimo de 3mm na altura (eixo Z) após cada passe, totalizando uma altura teórica de 48mm. Como ao final do processo foi medida uma altura média entre as três amostras de 32,33mm, pode-se afirmar que 32,64% do material depositado está distribuído entre a diluição de cada camada resultando na largura do cordão.

Tabela 6: Caracterização dos Cordões

	Número de camadas	Altura efetiva (mm)	Altura média camadas (mm/camada)	Largura média total (mm)
Camada base (1ª camada)	1	4	4	8,5
Amostras 1	12	31	2,58	14
Amostras 2	12	34	2,83	13
Amostras 3	12	32	2,66	13
Média	12	32,33	2,69	13,33

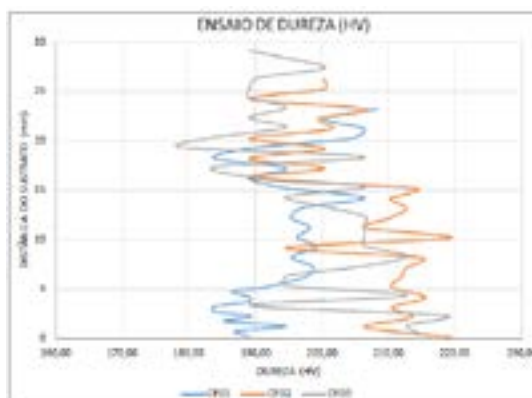
4.2 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

Os resultados obtidos ao longo do perfil de cada corpo de prova, seja no sentido vertical e horizontal são apresentados conforme Tabela 7.

Tabela 7: Valores médios dureza Vickers

Sentido	Valores médios Dureza Vickers (HV)	Desvio Padrão
Horizontal (CP01)	182,70	8,3
Horizontal (CP02)	197,40	8,7
Horizontal (CP03)	183,70	9,0
Vertical (CP01)	191,10	7,3
Vertical (CP02)	205,50	9,4
Vertical (CP03)	198,60	10,6

A Figura 7, mostra o comportamento da dureza Vickers no sentido longitudinal ao longo de todo o perfil do corpo de prova.

**Figura 7:** Comportamento Dureza (HV) sentido vertical. Fonte: do autor (2023).

A Figura 8, mostra o comportamento da dureza Vickers no sentido horizontal ao longo de todo o perfil do corpo de prova.



Figura 8: Comportamento Dureza (HV) sentido horizontal. Fonte: do autor (2023).

4.3. ENSAIO DE METALOGRAFIA

Após a impressão das amostras foram cortadas transversalmente e retirada um corpo de prova de cada amostra e preparadas metalograficamente conforme norma. Na Figura 9, são apresentadas uma amostra de cada corpo de prova com ampliação de 500x.

Pode-se perceber que o material AWS 5.18 ER70S-6 apresenta uma semelhança no tipo de microestrutura apresentada no aço SAE 1020. Como se trata de um aço hipoeutetóide, apresenta uma estrutura composta de dois constituintes: grãos de ferrita (parte mais clara) e o microconstituente Perlita (parte mais escura) – Fe₃C (Cementita) e Ferrita. Pode-se destacar a ausência de poros, destacando a qualidade da soldagem.

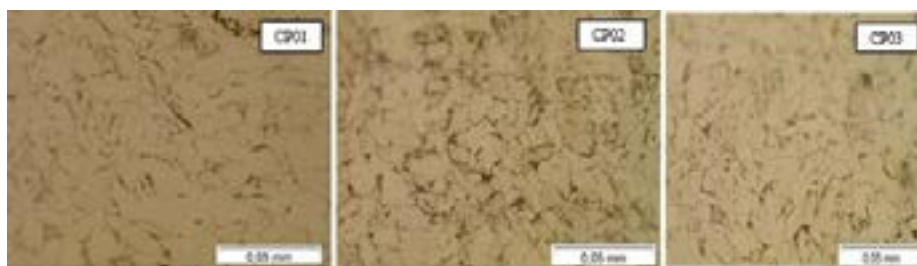


Figura 9: Metalografia dos corpos de prova. Fonte: do autor (2023).

5 CONCLUSÕES

Com os parâmetros e estratégia de deposição utilizados, as amostras não apresentam discontinuidades como mordeduras e porosidades ao longo das camadas, apresentado aceitável acabamento superficial e homogeneidade. Em relação as seções transversais das camadas, apresentam uma penetração suficiente, ou seja, não apresenta falta de fusão tanto no fundo quando na lateral da camada.

Com relação as propriedades mecânicas, o arame utilizado AWS 5.18 ER70S-6 apresentou uma dureza média de 193HV, ou seja, 53,3% maior se comparado com aço carbono SAE 1020. Informação essa, que pode ser explicado pelos elementos de liga que o arame utilizado possui, como por exemplo silício (Si) e maior teor de manganês (Mn).

Após análise metalográfica verificou-se que o arame AWS 5.18 ER70S-6 apresenta microestrutura semelhante entre os aços SAE 1008 e aço SAE 1020, assim sendo, na tecnologia MADA duplo arame pode-se utilizar esse tipo de arame mantendo as propriedades mecânicas encontradas nos aços não ligados na faixa de 0,2%pC.

Tendo em vista o objetivo do experimento, de avaliar e validar o processo MADA com utilização do método de duplo arame, pode-se concluir com os resultados que o processo se mostrou satisfatório em relação a qualidade apresentada nas amostras, embora ainda possam ser feitos novos experimentos com olhar na questão econômica e produtiva.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Universitário – UNISATC pelo apoio a pesquisa através do uso de sua estrutura de laboratórios e a Fundação de Amparo a Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina – FAPESC pelo apoio financeiro na compra de equipamentos e insumos para pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] OLIVEIRA, R.P. A influência do reaquecimento de camadas na microestrutura e na dureza de produtos de aço fabricados com manufatura aditiva por deposição a arco (MADA), comparando dois tipos de resfriamento: a ar e a água. Diss. de Mestrado. Mestrado Profissional em Engenharia da Produção, UFAM, 2022.
- [2] MACHADO, I.G. Soldagem e técnicas conexas: processos. Porto Alegre: editado pelo autor, 1996. 477p.
- [3] NADZAM, J. Gas metal arc welding guidelines. The Lincoln Electric Company, Cleveland, 2014.
- [4] GROETELAARS, P.J. Influência da variação de parâmetros de soldagem sobre a transferência metálica e perfil do cordão no processo MIG/MAG duplo-arame. Diss. de Mestrado. Mestrado em Engenharia Mecânica, UFU, 2005.
- [5] SCOTTI, A. Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho. São Paulo: Artliber, 2008.
- [6] Manual de Tecnologia de Fabricação e Soldagem. Núcleo Tecnológico de Soldagem & Qualidade, São Paulo, 2002.
- [7] Análise de metalografia. LabTeste Laboratório Metalúrgico, Santa Bárbara d'Oeste, 2023.
- [8] LUZ, G. Aço SAE 1020 Propriedades (e Fornecedores do Aço 1020). Blog Materiais, 2017.
- [9] COSTA, T.B.; ÁLVARO, J. L.; BALESTRA, R.M. Influência do tempo de cementação no aço SAE 1020. 8º Congresso de Engenharias da UFSJ, São João Del-Rei, 2018.
- [10] Catálogo de Arames de Aço Carbono. Tenax, Rio de Janeiro, 2023.
- [11] Ensaio de Dureza: Dureza Brinell. LabTeste Laboratório Metalúrgico, Santa Bárbara d'Oeste, 2023.
- [12] O que é Dureza Vickers? Rjeza Metalurgia, São Leopoldo, 2023.
- [13] LUZ, G. Aço SAE 1020 Propriedades (Mec, Qui e Lista de Fornecedores do Aço 1020). Blog Materiais, 2023.



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil

26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de

Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming

Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis

12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

ESTUDO DO PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA POR FUSÃO LOCALIZADA PARA LIGAS E71T-1 E ER70S-6

Pedro Henrique Menegaro Possamai ⁽¹⁾

Anderson Daleffe ⁽²⁾

Carlos Antônio Ferreira ⁽³⁾

Jiovani Castelan ⁽⁴⁾

Natan Damian Crozetta ⁽⁵⁾

Lirio Schaeffer ⁽⁶⁾

RESUMO

A manufatura aditiva (MA) de metais, conhecida popularmente por impressão 3D, surgiu com o objetivo de complementar e até substituir as técnicas já existentes de manufatura. Ainda não existe uma vasta gama de materiais que podem ser processados através dessa tecnologia, porém já é possível processar ligas de titânio, alumínio, níquel, cobalto cromo, aços inoxidáveis e aços maraging (ligas de Ni-Co-Mo-Ti de ultra-alta resistência). A MA possui vantagens: Um estudo de caso muito conhecido dentro da área é o do bico de abastecimento da GE, anteriormente o componente era resultado da junção de 20 peças diferentes e com a MA foi possível diminuir para somente uma peça. Neste estudo, a produção das peças foi feita utilizando uma máquina de soldagem Lincoln Power Wave E500 e robô YASKAWA YRC1000 AR1440, que ambos se tornaram uma máquina de manufatura aditiva por fusão localizada (MAFL). Com isso, os materiais de estudo foram o consumível tubular E71T-1 e o consumível maciço ER70S-6 para aço ABNT de médio e baixo carbono respectivamente. A caracterização dos corpos de provas se deu por ensaios de tração, dureza, usinabilidade e metalografia. As peças foram produzidas com propósito de avaliar a eficiência dos métodos usados na pesquisa.

Palavras-chave — Manufatura aditiva. Robô. Fusão localizada. Soldagem.

⁽¹⁾ Graduando em Engenharia Mecânica. Ano 2023-2. E-mail: pedropossamai@hotmail.com

⁽²⁾ Prof. Dr. Eng.; Centro Universitário UniSATC E-mail: anderson.daleffe@satc.edu.br

⁽³⁾ Prof. Me. Eng.; Centro Universitário UniSATC E-mail: carlos.ferreira@satc.edu.br

⁽⁴⁾ Prof. Dr. Eng.; Centro Universitário UniSATC E-mail: jovani.castelan@satc.edu.br

⁽⁵⁾ Graduando em Engenharia Mecânica. Ano 2023-2. E-mail: crozettanatan@hotmail.com

⁽⁶⁾ Prof. Dr. Eng.; E-mail: 00002781@ufrgs.br

1. INTRODUÇÃO

O processo de MA consiste na criação da forma desejada através da adição de materiais camada por camada. Seu princípio é baseado no fato de que todo objeto pode ser decomposto em diversas camadas e reconstruído com as mesmas, independente de sua complexidade geométrica (BRAGA, 2017).

O conceito surgiu no Japão através de pesquisas de Hideo Kodama, desenhista automotivo. Kodama trabalhava com polímeros foto endurecido no Instituto de Pesquisas de Nagoya, em 1981 (BRUCK, 2021). Inicialmente as técnicas de MA eram utilizadas apenas para produção de protótipos (*rapid prototype- RP*). Atualmente suas aplicações na indústria não mais se limitam a modelos reduzidos, mas também a produtos finais de grande complexidade (BRAGA, 2017).

O propósito deste estudo consiste em avaliar a eficácia do procedimento de MAFL ao empregar arame sólido (*gás metal arc welding - GMAW*) e arame tubular (*flux cored arc welding - FCAW*) como consumíveis de soldagem. Nossa abordagem envolverá a configuração dos parâmetros de deposição e fusão, bem como a avaliação das capacidades de cada processo. Além disso, será conduzida a produção de corpos de prova destinados a ensaios de tração, dureza, usinabilidade e análise metalográfica. Posteriormente, os dados obtidos serão coletados e comparados para realizar uma análise comparativa entre os métodos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

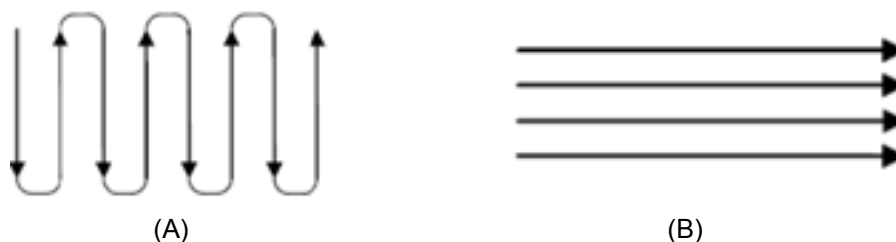
A necessidade de aumentar a velocidade de criação e implementação de produtos tem feito da MA um aliado no desenvolvimento de novos produtos e sua utilização na indústria, os quais vêm crescendo gradualmente nos últimos anos e gerando inovações (GOMES; WILTGEN, 2020).

O processo de MA metálico pode ser classificado em três principais categorias, sendo o *Power-bed-technology* (PBT) que usa uma camada de pós-metálicos que são fundidos por uma fonte de calor concentrada. Há o *laser metal deposition* (LMD) no qual o pó metálico é soprado concêntrico a um feixe de laser que funde as partículas. Por fim a categoria *wire technology* que utiliza um arame maciço ou tubular e uma fonte de calor como o arco elétrico. Na categoria *wire technology* o arame pode ser alimentado concêntrico com a fonte de calor ou descentralizado com a fonte de calor, e a fonte de calor pode ser o arco elétrico (*wire and arc additive manufacturing - WAAM*), laser (*wire and laser additive manufacturing - WLAM*) ou feixe de elétrons (*wire and electron beam additive manufacturing - WEAM*) (ANTONELLO, 2022).

As tecnologias de WAAM, utilizada nesse estudo, se destacam por garantirem maiores taxas de deposição que outros processos de manufatura aditiva de metais, maior eficiência da matéria prima e menor custo quando comparado às tecnologias laser que utilizam pó. Segundo pesquisadores, enquanto que um processo PBT ou LMD tem taxas de deposição de até 10 g/min, as tecnologias WAAM atingem taxas de deposição de até 130 g/min. Ademais, grande parte dos equipamentos que hoje são utilizados na WAAM tem sido aprimorada para soldagem de materiais há mais de 100 anos. Por outro lado, em geral, os componentes fabricados por WAAM não apresentam a geometria final requerida ao produto, fornecendo uma rugosidade superficial de aproximadamente 500 µm. Ou seja, uma etapa de usinagem é necessária na finalização do produto (GOMES, 2018).

2.1. Estratégias de deposição

Algumas considerações devem ser feitas no sentido de minimizar os possíveis defeitos no produto manufaturado e parte delas está relacionada às estratégias de deposição empregadas. MARTINA *et al.* (2012) em seu estudo utilizando WAAM com ligas de Ti notou que em suas deposições havia um acúmulo de material no início do cordão e uma depressão ao final do cordão. O acúmulo de material pode ser explicado devido ao substrato mais frio no início da camada, enquanto que a depressão é explicada pela ausência de uma poça quente a frente da tocha. Atenua-se a depressão através de uma deposição utilizando menores correntes ao final da trajetória. No entanto, uma solução eficiente, que não precisa estar associada à modificação de parâmetros é a deposição alternando as origens, ou seja, a deposição subsequente inicia onde a deposição anterior terminou. A Fig. 1 apresenta as duas direções de deposição que podem ser empregadas (GOMES, 2018).

Figura 1: Direções de deposição: (A) Alternada e (B) Paralela

Fonte: Adaptado de GOMES (2018).

Espera-se que a movimentação do robô seja dificultada pelo fato da MA ser pouco tolerante a mudanças na direção da tocha de soldagem, podendo afetar o cordão depositado, conforme apontado por MARTINA (2012). Portanto, é importante garantir que a tocha esteja posicionada igualmente na deposição de cada camada, independente da trajetória de deposição escolhida (GOMES, 2018).

2.2. Estimativas da altura dos cordões

Um dos parâmetros mais importantes em qualquer processo de MA é a altura dos cordões que são depositados em cada uma das camadas da peça. Este parâmetro define o tamanho do incremento na direção da altura que a peça ou a tocha deve realizar antes que a deposição de uma nova camada seja iniciada. A correta determinação das alturas dos cordões é de especial importância no caso de processos de soldagem MIG/MAG para que a Distância Bico de Contato-Peça (DBCP) se mantenha constante no valor inicial determinado, já que variações neste parâmetro influenciam diretamente a geometria do cordão de solda uma vez que alteram a intensidade da corrente em processos convencionais ou a tensão, no caso de fontes com imposição de corrente. Além disto, mudanças na DBCP geram alterações na interface arco-poça, o que significa que tanto a pressão quanto a geometria do arco se alteram causando, conseqüentemente, alterações na área superficial afetada (SANTOS E SILVA, 2017).

2.3. Consumíveis para soldagem por MA

Os arames de solda desempenham um papel importantíssimo na indústria metalúrgica. Portanto, conhecer as alternativas e optar entre o modelo GMAW ou FCAW é vital para que a fabricação e a montagem dos produtos tenha a qualidade desejada. Ambos são processos de soldagem por fusão, com arame alimentado de forma contínua e o arco elétrico sendo estabelecido entre o eletrodo e a peça, podendo ser protegido por gás de proteção (arame maciço e arame tubular com proteção gasosa) ou não (arame tubular auto protegido). Para ambos os processos os equipamentos são os mesmos (SOEIRO; LUZ; BRANDI, 2015).

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O presente estudo será executado no Laboratório de manufatura aditiva do Centro Universitário UNISATC, onde o mesmo irá fornecer todos os materiais que serão utilizados nos métodos abordados nas seções seguintes.

3.1. Materiais utilizados

Para realização do estudo os consumíveis utilizados foram o consumível maciço cobreado (AWS A5.18 ER70S-6) com diâmetro de 1,2 mm e o consumível tubular do tipo rutilico com proteção gasosa (AWS A5.20 E71T-1) com diâmetro de 1,2 mm. Suas composições químicas são especificadas nas Tab. 1 e 2, conforme a especificação AWS. O substrato a ser utilizado será de aço SAE 1045 e o gás para proteção será o StarGold Plus. Suas composições químicas são especificadas nas Tab. 3 e 4.

3.1.1. Consumível Sólido AWS A5.18 ER70S-6

O consumível ER70S-6 é um GMAW com exclusiva tecnologia de fabricação que resulta em uma superfície do arame limpa e lisa, com uma camada uniforme de revestimento de cobre e uma quantidade adequada de lubrificante que auxilia na alimentação. Estas vantagens asseguram uma

baixa fricção durante a alimentação do arame e melhor condutibilidade elétrica, aplicável para soldagem em todas as posições nos processos semiautomáticos e automáticos. Material desenvolvido para soldagem de materiais em aço carbono, utilizando como um gás de proteção 100 % CO₂ ou 75 % de Ar e 25 % de CO₂.

Tabela 1: Composição química consumível ER70S-6

Composição química	Valores %
Carbono (C)	0.06 – 0.15
Manganês (Mn)	0.04 – 0.85
Silício (Si)	0.80 – 1.15
Enxofre (S) máx.	0.035
Fósforo (P) máx.	0.025
Níquel (Ni) máx.	0.15
Cromo (Cr) máx.	0.15
Molibdênio (Mo) máx.	0.15
Vanádio (V) máx.	0.03
Cobre (Cu) máx.	0.5

Fonte: Adaptado de SOEIRO; LUZ; BRANDI (2015)

3.1.2. Consumível Tubular AWS A5.20 E71T-1

O consumível E71T-1 é um FCAW com proteção gasosa, básico-rutílico, aplicável para soldagem em todas as posições nos processos semiautomáticos e automáticos. Material de ótima soldabilidade, fácil controle de arco e da poça de fusão, além de uma fácil remoção de escória. Baixos níveis de respingo e fumos metálicos. Desenvolvido para soldagem de materiais em aço carbono, utilizando como um gás de proteção 100 % CO₂ ou 75 % de Ar e 25 % de CO₂.

Tabela 2: Composição química consumível E71T-1.

Composição química	Valores %
Carbono (C) máx.	0.12
Manganês (Mn) máx.	1.75
Silício (Si) máx.	0.9
Enxofre (S) máx.	0.03
Fósforo (P) máx.	0.03
Níquel (Ni) máx.	0.5
Cromo (Cr) máx.	0.2
Molibdênio (Mo) máx.	0.3
Vanádio (V) máx.	0.08
Cobre (Cu) máx.	0.35

Fonte: Adaptado de SOEIRO; LUZ; BRANDI (2015)

3.1.3. Aço SAE 1045

Para realização da MAFL será necessário utilizar uma chapa como base, também chamada de substrato, será utilizado uma chapa de aço SAE 1045. Com medidas de 200 X 75 X 6 mm. O aço SAE 1045 possui uma aplicação muito ampla, pois é encontrado na fabricação de peças e como ferramentas de corte em processos de fabricação.

Tabela 3: Composição química do aço SAE 1045

Composição química	Valores %
Carbono (C)	0.43 – 0.50
Enxofre (S) máx.	0.05
Manganês (Mn)	0.60 – 0.90
Fósforo (P) máx.	0.04
Silício (Si)	0.10 – 0.60

Fonte: Adaptado de AZEVEDO (2002)

3.1.4. Gás StarGold+ Plus

O gás StarGold+ Plus é uma mistura composta de Argônio e CO₂. Desenvolvida especialmente para a soldagem MAG dos aços ao carbono e baixa liga, superando todos os requisitos da norma AWS. É versátil, tem alta eficiência, permite excelente acabamento visual e alta penetração. Além disso, também oferece transferência por curto-circuito ou spray para uso geral, em qualquer espessura de chapa (WHITE MARTINS GASES IND. LTDA, 2023).

Tabela 4: Composição química Gás STARGOLD+ PLUS

Composição química	Valores %
Carbono (C)	0.09 – 1.12
Manganês (Mn)	1.30 – 1.53
Silício (Si)	0.65 – 0.98
Enxofre (S) máx.	0.008 – 0.015
Fósforo (P) máx.	0.008 – 0.014
Cobre (Cu) máx.	0.22 – 0.30

Fonte: Adaptado de WHITE MARTINS (2023)

3.2. Processamento

Para o desenvolvimento desse experimento serão utilizados um robô Yaskava Motoman AR1440 com uma central de controle Yaskava Motoman YRC1000 e uma máquina de soldagem Lincoln Power Wave E500 que juntas formarão uma máquina de MAFL.

3.3. Ensaio mecânicos

Realizados os corpos de provas obtidos por MA, deu-se então a execução dos seguintes ensaios mecânicos.

3.3.1. Ensaio de tração

O ensaio de tração é um ensaio mecânico amplamente utilizado para a determinação das propriedades mecânicas de um material. Para o ensaio foram preparadas as amostras utilizando uma retífica e posteriormente cortadas em uma máquina de fibra a laser. Desta forma, as amostras foram preparadas a 0°, 45° e 90° em relação ao substrato de deposição. Os corpos de prova foram cortados com dimensões conforme NBR ISO 6892.

3.3.2. Ensaio de microdureza Vickers

Dureza é uma característica mecânica que se refere à capacidade de um material resistir ao desgaste ou à deformação permanente quando submetido à pressão de outro material ou a pontas de medida padronizadas. Para avaliar a dureza dos materiais, será aplicado o método de ensaio de microdureza Vickers (HV), que utiliza um penetrador único em forma de pirâmide de diamante com base quadrada e ângulo de 136° entre suas faces opostas, seguindo os princípios desse método.

3.3.3. Ensaio de usinabilidade

O índice de usinabilidade dos materiais tornou-se indispensável para garantia de viabilidade de novos processos, para a usinagem as condições de corte como velocidade de corte, avanço,

profundidade, ferramenta, máquina operatriz, fluidos e composição química do material são os fatores que mais influenciam a usinabilidade de um material. Há diversas operações de usinagem, mas nos atentaremos nas operações de fresamento visto com a finalidade de usinar pontos específicos da peça, onde foi feita usinagem para acabamento. Verificando após a usinagem se a peça apresenta as tolerâncias dimensionais adequadas.

3.3.4. Metalografia

A metalografia é a ciência que estuda e caracteriza o comportamento microestrutural e elementos constituintes dos metais, ligas e outros materiais. Apresenta-se como a mais importante técnica de análise microestrutural dos metais, sendo possível definir as fases e a orientação cristalográfica dos grãos presentes. O ensaio metalográfico foi realizado seguindo a norma ABNT NBR 15454.

3.4. Programação

A programação para obtenção das peças manufaturadas foi feita manualmente no controle PENDANT MOTOMAN DX200, tendo como variáveis iniciais uma velocidade de avanço da máquina com 10 mm/seg (milímetros por segundo) em zigue-zague, amplitude de 3 mm com uma frequência de 5 Hz, altura da tocha para cada camada de 10 a 15 mm, e o percurso que a tocha faz a cada passe.

Em uma primeira tentativa, a máquina fazia a deposição de um cordão em apenas um sentido, retornava ao ponto inicial e repetia esse ciclo. No entanto, ao final de cada cordão observou-se um decaimento, deixando a peça irregular.

Devido a essa situação, uma estratégia em zigue-zague com um delay de 10 s no final do cordão foi realizada e obteve-se uma deposição regular ao qual foi adotada para este trabalho.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na sequência, serão tratados os resultados obtidos ao longo desse estudo. Por se tratar de uma técnica nova de manufatura, esse experimento teve o propósito de buscar uma quantidade significativa de ensaios com o objetivo de obter diferentes resultados, e dessa forma ter uma boa conclusão do processo.

4.1. Obteção dos corpos de prova e ensaio de tração

A Fig. 4 mostra as paredes obtidas por manufatura aditiva, onde a parede 1 foi impressa com consumível ER70S-6 e a parede 2 impressa com consumível E71T-1.

Figura 4: Paredes obtidas por manufatura aditiva.



Fonte: Do autor (2023)

Abaixo a Fig. 5 apresenta a orinetação dos corpos de prova cortados, visando os resultados no ensaio de tração.

Figura 5: Orientação dos corpos de prova

Fonte: Do autor (2023)

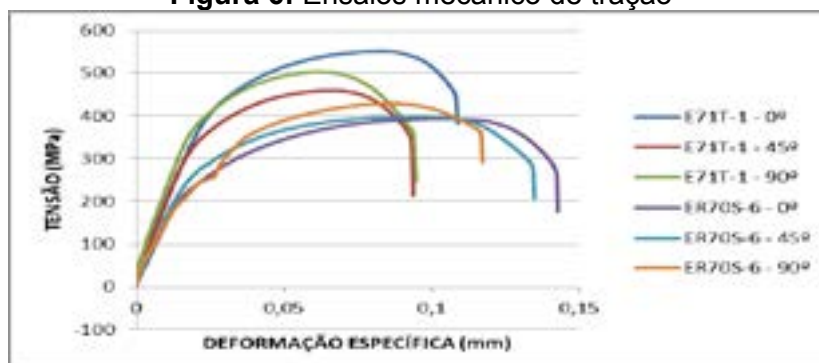
Na Tab. 5 observa-se a caracterização dos cordões nas paredes obtidos como resultados da manufatura.

Tabela 5: Caracterização das paredes

	Altura média por camada (mm/camada)	Nº de camadas	Altura média efetiva (mm)	Largura média total (mm)	Largura média efetiva (mm)
E71T-1	1,2	200	240	11	6
ER70S-6	1,1	200	220	11	6

Fonte: Do autor (2023)

Como é possível perceber no gráfico a relação de tensão e deformação específica, mostrado na Fig. 6, os corpos de prova estudados possuem um comportamento dúctil.

Figura 6: Ensaios mecânico de tração

Fonte: Do autor (2023)

Comparado com a Tab. 6, onde apresentam-se seus resultados, os mesmos possuem tensões máxima entre 460 MPa e 551,4 MPa para o consumível E71T-1, 393,4 MPa e 437,9 MPa para o consumível ER70S-6, comparados com a literatura. A tensão de escoamento também segue essa linha de comparação de resultados.

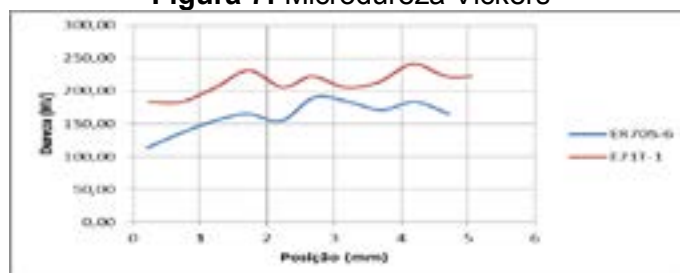
Tabela 6: Resultados dos ensaios mecânico de tração

Ensaio	Tensão máxima σ Máx. [MPa]	Tensão de escoamento σ_e [MPa]
E71T-1 Tração 0°	551,4	115,5
E71T-1 Tração 45°	460	151,2
E71T-1 Tração 90°	504,7	112,5
ER70S-6 Tração 0°	393,4	198,1
ER70S-6 Tração 45°	399,3	204,8
ER70S-6 Tração 90°	437,9	125,4

Fonte: Do autor (2023)

4.3. Ensaio de microdureza VICKERS

Para o estudo realizou-se 8 penetrações com 45° em relação ao substrato de deposição, aplicando-se uma força de 2,942 N, e uma distância de 0,5 mm a cada penetração. Os valores de dureza médio na amostra de E71T-1 foram maiores, partindo do fato de que suas microestruturas tiveram uma formação mais homogênea de perlita ao longo da microestrutura. Já os valores de dureza da amostra de ER70S-6 foram mais baixos, pelo fato de que houve menor formação de perlita ao longo da microestrutura, conforme Fig.7, fazendo com que o material obtivesse menor dureza.

Figura 7: Microdureza Vickers

Fonte: Do autor (2023)

Na Tab. 7, verifica-se os valores médio do perfil de dureza coletados nas amostras.

Tabela 7: Ensaio de microdureza Vickers

Consumíveis	HV Médio	Desvio Padrão
E71T-1	212,6	18,1
ER70S-6	161,8	23,7

Fonte: Do autor (2023)

4.4. Ensaio de usinabilidade

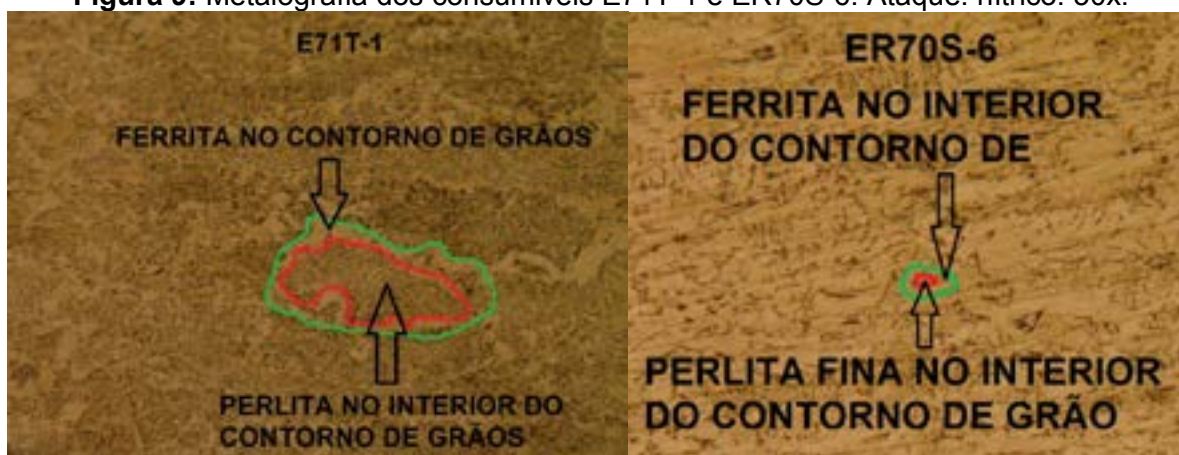
Para o teste de usinabilidade da peça produzida com o consumível ER70S-6 com 5 mm de desbaste apresentou superfície acabada com riscos, por ter um teor de carbono menor, onde o mesmo apresentou formação de aresta postiça. O consumível E71T-1 com 4 mm de desbaste já apresentou superfície acabada sem riscos, por apresentar médio teor de carbono, apresentou melhores acabamentos, sem a formação de aresta postiça, o que é característico de materiais com maior teor de carbono. A Fig. 8 mostra as peças usinadas, onde o tubo 1 foi impresso com consumível ER70S-6 e o tubo 2 impresso com consumível E71T-1.

Figura 8: Tubos usinados.

Fonte: Do autor (2023)

4.5. Metalografia

O consumível E71T-1 apresenta uma microestrutura de aço médio carbono, comparado com o livro Colpaert, Pág 159, Fig. 283, apresenta ferrita no contorno de grãos e perlita no interior do contorno de grãos, a perlita apresenta aspecto grasseiro que pode ser explicado pelo resfriamento lento, e justifica a dureza de 212,6 Vickers. Já o consumível ER70S-6 apresenta ferrita no contorno de grãos e perlita fina no interior do contorno de grãos, representados na Fig. 9.

Figura 9: Metalografia dos consumíveis E71T-1 e ER70S-6. Ataque: nítrico. 50x.

Fonte: Do autor (2023)

5. CONCLUSÕES

Após os experimento e comparação dos resultados, concluiu-se que ambos os métodos de fabricação entregaram resultados positivos, pelo fato de apresentarem homogeneidade no processo mediante as análises realizadas, sendo um fator importante do ponto de vista do processo de fabricação.

O estudo se tornou relevante, já que as ligas metálica estudadas apresentam elementos de liga como manganês, níquel, cromo e molibdênio. De acordo com a referência bibliográfica, a combinação desses elementos pode resultar em características essenciais como resistência à fadiga, resistência ao desgaste e resistência mecânica, e desta forma vir a ser utilizada para produção de peças voltadas para aplicações de engenharia.

O processo de M.A. com consumível E71T-1 produz deposição de camadas e peças com maior tenacidade, sendo mais indicado nas situações onde requer uma boa resistência ao impacto

O processo de M.A. com consumível ER70S-6 produz material depositado com menor perfil de dureza em sua seção transversal, sendo indicada nas situações onde são exigidos limites menores de dureza.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Universitário – UNISATC pelo apoio a pesquisa através do uso de sua estrutura de laboratórios e a Fundação de Amparo a Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina – FAPESC pelo apoio financeiro na compra de equipamentos e insumos para pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] ANTONELLO, Miguel G. Construção e expansão eletromagnética do arco elétrico no processo GTAW aplicada na manufatura aditiva, 2022. Disponível em: <file:///d:/Users/User/Downloads/Tese_Miguel_Antonello_2022_01.pdf> Acesso em: 06 de maio de 2023.
- [2] BRAGA, Luísa M. Manufatura aditiva: uma análise de aplicações atuais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, (Pg. 8). Dezembro de 2017. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/33323/33323.PDF> Acesso em: 05 de março de 2023.
- [3] BRUCK, Alexandre. Manufatura Aditiva para Metais e Polímeros, 2021. Disponível em: <https://c2lab.com.br/blog-manufatura-aditiva-metais-e-polimeros/> Acesso em: 04 de março de 2023.
- [4] COLPAERT, Hubertus. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. 3° Ed. São Paulo: Instituto de pesquisas tecnológicas, 1983. Pág. 159. Fig. 283.
- [5] GOMES, Bianca F. Manufatura aditiva e caracterização de componentes da liga AL-4,4%MG utilizando diferentes processos de deposição metálica - CMT, PMC E PMC-MIX, 2018. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/12932/1/BiancaFerreiraGomes.pdf> Acesso em: 06 de maio de 2023.
- [6] GOMES, João F.; WILTGEN, Filipe. Avanços na manufatura aditiva em metais: técnicas, materiais e máquinas, 2020. Disponível em: <file:///d:/Users/User/Downloads/admin,+9917+(2)-13.04.2020.pdf> Acesso em: 18 de fevereiro de 2023.
- [7] SANTOS E SILVA, Fernando L. Desenvolvimento de estratégias para manufatura aditiva via soldagem a arco, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/199984/PFC%20Fernando%20Lucas%20dos%20Santos%20e%20Silva_2016-2.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em: 06 de maio de 2023.
- [8] SOEIRO, Jaime C.; LUZ, Mauro A.; BRANDI, Sérgio D. Comparação da Taxa e Eficiência de Deposição entre os Consumíveis ER70S-6 e E71T-1C, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/si/a/BswkPYRgGMJFyb5Cfg7JqWs/?lang=pt#> Acesso em: 20 de agosto de 2023.



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil

26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis

12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

SURFACE INTEGRITY AND MECHANICAL PROPERTIES EVALUATION OF LPBF 316L STEEL FOR AUTOMOTIVE TOOLS MANUFACTURING

Matheus Rubik ⁽¹⁾
Ronnie Rego ⁽²⁾
Bruno Lima ⁽³⁾
Izabel Lima ⁽⁴⁾
Victor Chastinet ⁽⁵⁾

ABSTRACT

Additive Manufacturing (AM) is a technology with the disruptive potential to increase the competitiveness of the Tooling Chain. However, the application is not mature. The development of Additive Manufacturing for the repair and manufacture of Tools for the Brazilian Automotive Industry is necessary for better lead time and parts inventory reduction. The objective of this study is to show the surface integrity evolution in a Laser Powder Bed Fusion (LPBF) manufacturing chain of a tool with a mass reduction concept. Several samples were manufactured to select a better parameterization of the process and to evaluate the mechanical properties. Experimental evaluation was conducted to compare the surface integrity obtained in samples after deposition and after removing the baseplate. The study that there is influence of the part position on the baseplate in the residual stress state of the samples. This effect is correlated to the gas flow during the deposition, causing different levels of distortion in the samples. This arise the discussion if it is possible to have preferential points in the baseplate for component deposition. The mechanical tests also showed a higher tensile strength of samples printed in the orthogonal direction. In the present work, the part was manufactured and validated on the shop floor, demonstrating the viability of building tools for the automotive industry using additive manufacturing.

⁽¹⁾ Mechanical Engineer, Aeronautics Institute of Technology, matheusrubik@ita.br,

⁽²⁾ Prof. Dr. Ing.; Aeronautics Institute of Technology, Brazil.

⁽³⁾ Ms.c, Aeronautics Institute of Technology, Brazil.

⁽⁴⁾ Metallurgical Engineer, Aeronautics Institute of Technology, Brazil.

⁽⁵⁾ Mechanical Engineer, SENAI Institute of Innovation, Brazil.

Keywords — Laser Powder Bed Fusion; Surface integrity; Additive manufacturing.

1. INTRODUCTION

Additive manufacturing is an innovative process with the potential to increase the competitiveness of the tool production chain. The ability to manufacture items that are virtually impossible to make by conventional methods brings a major advantage to the process [12]. One of the main advantages of the process over conventional manufacturing is the lack of tooling and the low waste generated [7]. However, LPBF has some points that need to be advanced regarding manufacturing to be competitive. Components manufactured by LPBF often cannot be directly used for their function due to some disadvantages of the process. High surface roughness, dimensional mismatch, residual stress, and low density are some of the main causes [8].

This study is focused on the development of an operational demonstrator analyzing the manufacturing concerning surface integrity characteristics to analyze how the parameters used affected the final product. The objective is the parameterization, manufacturing, and post-processing of an LPBF automotive tool demonstrator, focusing on the mass reduction of the demonstrator using the concept of design for additive manufacturing.

2. MATERIALS AND METHODS

For this study, parameterization has a major importance, several fabrications were carried out to better define the strategy for bulk and contour. These depositions varied the deposition strategy, laser power, hatching, and scan speed. The manufactured samples have dimensions of 20 x 12 x 6 mm, using 316L with several conditions, to have an ideal parametrization and use it in the demonstrator. To obtain better parameterizations and information such as roughness, residual stress, density, and distortion, Figure 1 shows the disposition and the geometry of the samples.

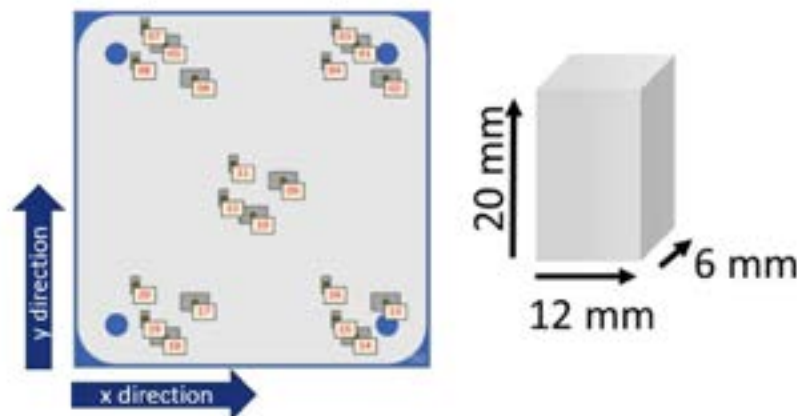


Figure 1: Disposition and geometry of LPBF samples

For the manufacture of the samples analyzed in this work and for the demonstrator, the same parameters were used. This parameterization was chosen due to the higher density, lower roughness, and absence of failures during manufacturing. Table 1 shows all the parameters used.

Table 1: Parameters used for the manufacturing.

Parameter	Value
Material	316L
Filling strategy	Chess
Thickness	60 μ m
Filling power	325 W

Hatching	0,075 mm
Filling speed	900 mm/s
Contouring strategy	Contouring followed by filling
Contouring power	200 W
Contouring speed	200 mm/s

To define the new demonstrator design, reverse engineering and a several iterative loops were necessary to optimize the topography of the part, checking the initial requirements for the operation and requirements for the manufacturing, such as the need for support and operational loads. The aim of the redesign was to minimize mass, which was only possible through additive manufacturing, while maintaining a safety coefficient of 2 and the same functionality as the original part.

For the roughness measurements, a surface rugosimeter Taylor Hobson® Surtronic S-100 Series was used, a 0.8 mm sampling length, 4 mm measurement length and Gaussian filter were used. All samples had repeatability of five equidistant measurements on the same surface and in the directions perpendicular and parallel to the deposition. For the density measurements, the Archimedes method was employed following the standard ASTM B-311 [3], for the density measurements, 10 repetitions were made on a precision balance with the dry samples and 10 repetitions with the submerged samples.

The measurement of residual stresses in the samples were done by using the Pulstec® μ -X360s X-ray diffractometer (XRD), which is equipped with 2D detectors and uses the $\cos\alpha$ method for residual stress evaluation. The measurements were performed on the samples still fixed on the substrate, after removal by electroerosion, and on the demonstrator. On the demonstrator, four points were measured on the side, one on the face where it was cut by electroerosion of the substrate, and one point on the crown. The points were trimmed equidistant and in places where the simulation showed higher stresses.

Tensile tests were carried out on samples manufactured vertically and horizontally, using a Instron® universal testing machine. The samplings were deposited with a cilindric geometry and then machined in accordance with samples 3 of ASTM E8/E8M – 16a standard [2].

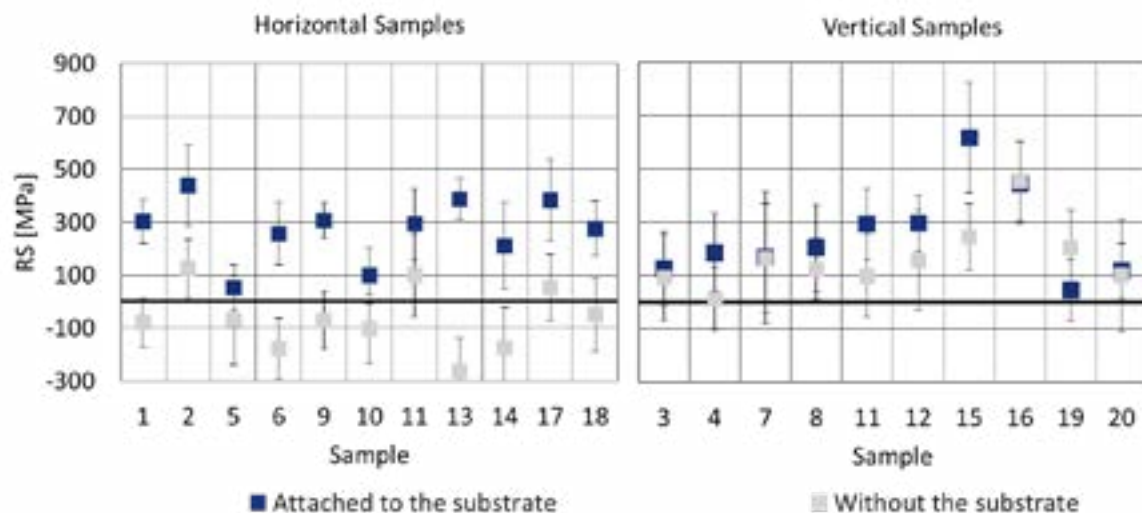
3. RESULTS AND DISCUSSIONS

The new geometry features a significant mass reduction and a reduced printing speed, facilitating the operation and manufacturing of the component, Figure 2 shows the development of these two characteristics. Besides the reduction in mass and the manufacturing time, some features have been added, such as the replaceable toothed crown, which can be replaced when it wears out. Along the crown, there is a mechanical fuse, so that if there is an overload in the operation, the demonstrator does not damage.

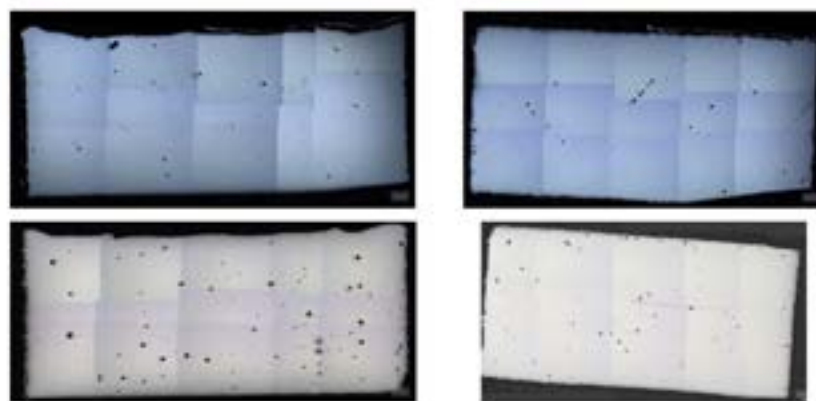


Figure 2: Topology optimization of the demonstrator

Considering the physical characteristics of 316L deposited by LPBF, the residual stress, with the samples still attached to the substrate and measured on the upper surface, is tensile in the vertical and horizontal samples, with an average magnitude of 159 MPa. However, in the samples that had the possibility of measuring on the lateral surface, the residual stress was close to 0 MPa. After the samples were cut by EDM, the horizontal samples had their residual stress changed to compressive, while the vertical samples remain tensile but with a slightly smaller magnitude. Reference [10] shows similar behavior were the samples as built and after remotion from the substrate has a decrease in residual stress. Figure 3 shows the two stages of the process.

**Figure 3:** Residual stress of clamped and cut samples from the substrate

Archimedean density tests showed maximum densities of 98.6% and minimum densities of 98.1%. The literature shows values between 99,91% to 98% [1], with multiple references between this range [9]-[11]. Metallographic analysis shows that larger pores occur more in the bulk and smaller pores are more concentrated in the subsurface, with a lower relative density in the bulk compared to the overall density due to the density of the first micrometers being lower than that of the rest of the part, as shown in Figure 4.

**Figure 4:** Cross-section of samples in LPBF

The roughness, measured in Ra, for measurements parallel and perpendicular to the deposition showed statistically equal values. The roughness in the perpendicular direction showed a slightly

higher value, with an average of Ra 8.10 μm and a standard deviation of 1.22 μm . Values compatible with the literature, where values from Ra 8 μm to Ra 12 μm are found [6]. Figure 5 shows the roughness found.

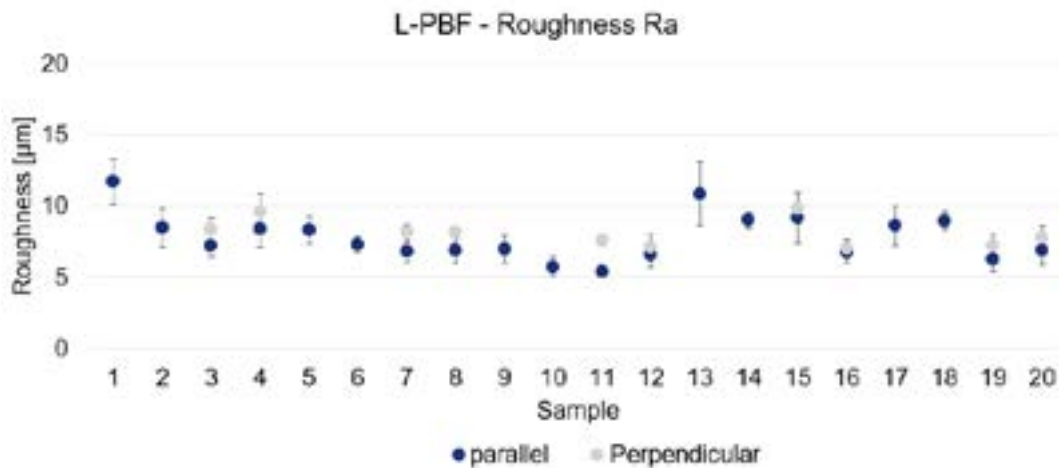


Figure 5: Roughness Ra of the samples in LPBF

Another characteristic observed is the distortion of the parts due to the flow of inert gas used in the deposition of the material. distortions of up to 0.2 mm were observed concerning the nominal dimension of the samples being this distortion was linked to the arrangement of the samples on the substrate. This shows that there are preferential positions for manufacturing where there is less distortion of the component, areas with less distortion are preferred due to greater predictability and the need for less stock, reducing the cost and time of printing. Figure 6 shows the distortion found in the samples.

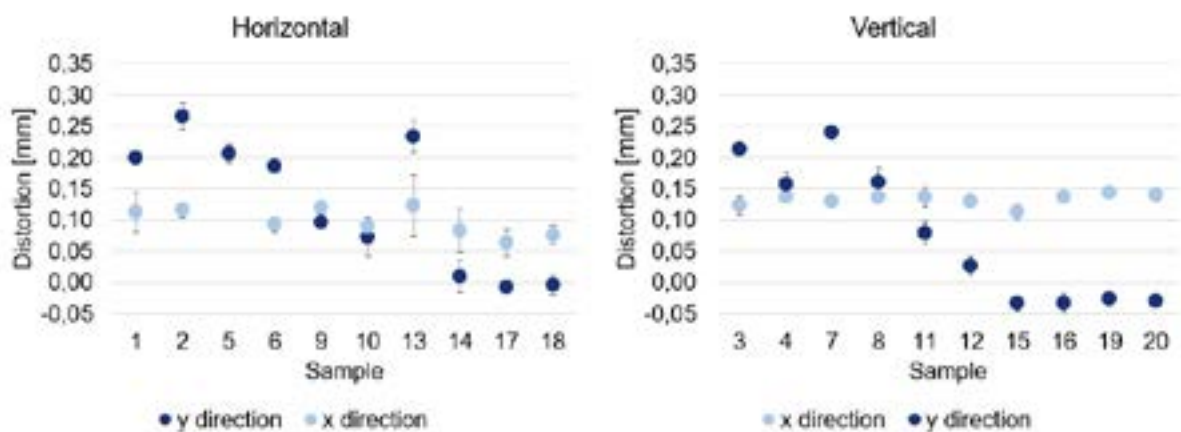


Figure 6: Geometrical distortion of samples in LPBF

Of the ten tensile tests carried out, five were for vertical samples and five for horizontal. The average for ultimate tensile strength is 547 MPa and for yield strength 346.8 MPa for vertically manufactured samples and these values are respectively 9.21% and 5.36% higher for horizontally manufactured samples. Reference [5] shows values 50 MPa higher than those obtained in the tests.

For the demonstrator, the residual stress is compressive throughout the body. In the six areas measured, the most compressive stresses were in the EDM cut. There is no clear trend between the four measured heights, however, the four points are grouped as shown in Figure 7. The crown, with measurements on the top face, shows similar behavior to the demonstrator, with slightly compressive stresses but with larger errors due to low thickness. For the EDM cut measurement on the demonstrator, there is a very compressive residual stress when compared to the crown due to the abrupt difference in the height of the two parts.

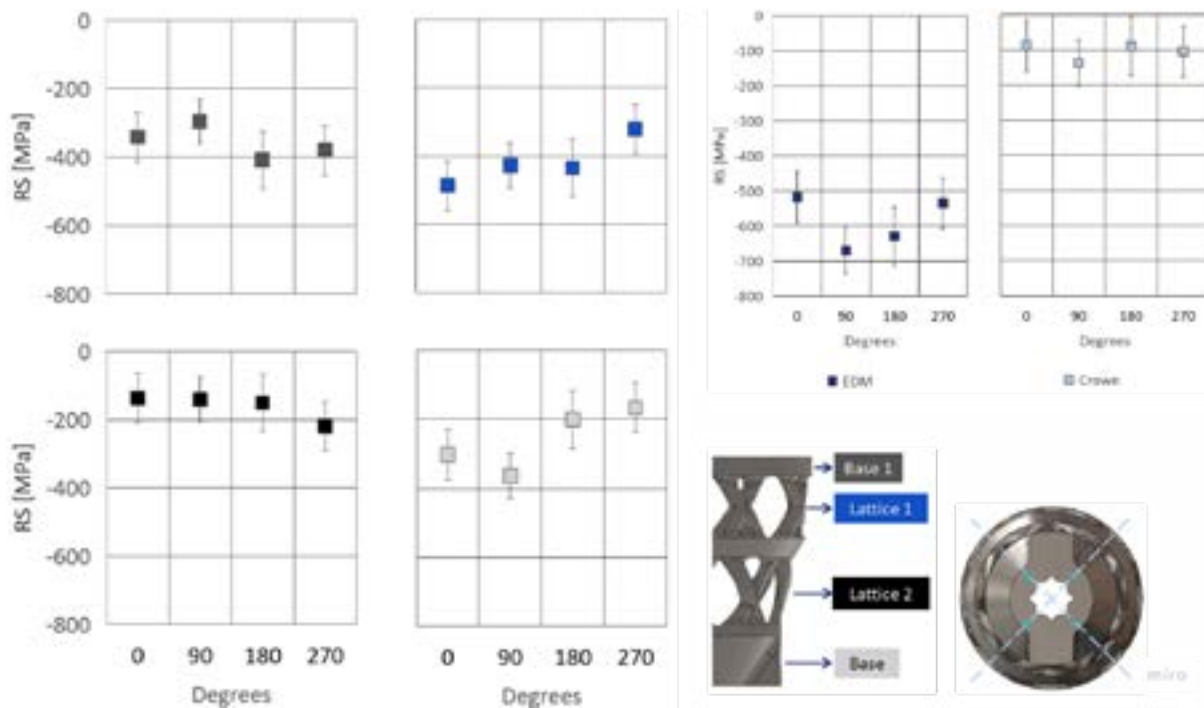


Figure 7: Residual stress in the demonstrator

For the roughness measurements on the demonstrator, compared to the initial samples 35% lower Ra values were obtained. This reduction was due to the stress-relieving treatment done by shot peening. An average of Ra 5,76 μm at the crown and an average of Ra 5,37 μm at the base.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK

The main objective has been achieved, the material was parameterized, the part was manufactured, evaluated for surface integrity, and validated on the shop floor, demonstrating the viability of building tools for the automotive industry using additive manufacturing. The part was positively evaluated by the operator for better ergonomics, due to reduced mass, and good durability, replacing the old part with better performance.

The residual stress analysis on the samples shows a stress reduction when the part is removed from the substrate, sometimes transforming the tensile stress into compressive stress. In the demonstrator, analyzed after removal from the substrate, all residual stresses were compressive. The density obtained in the tests is at a level within that found in the literature, together with the roughness found. The distortion found in the parts due to the gas flow was analyzed, showing a more favorable location for new depositions.

Further studies related to distortion should be carried out looking for other causes and effects, such as alignment of the laser used. Studies related to surface densification, such as shot peening, where compressive residual stress is forced together with densification, can have significant results. Optimizations focusing on the mass reduction of the demonstrator are possible, being able to refine the topological optimization or use another material.

REFERENCES

- [1] AHMED, Nissar et al. Process parameter selection and optimization of laser powder bed fusion for 316L stainless steel: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 75, p. 415-434, 2022.
- [2] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM E8/E8M-16a.
- [3] ASTM B-311. Standard test method for density of powder metallurgy (PM) materials containing less than two percent porosity 1. ASTM International, v. 93, n. Reapproved, p. 1-5, 2008.
- [4] DRYEPONDT, Sebastien et al. Microstructure and high temperature tensile properties of 316L fabricated by laser powder-bed fusion. *Additive Manufacturing*, v. 37, p. 101723, 2021.
- [5] GOUVEIA, Ronny M. et al. Effect of scan strategies and use of support structures on surface quality and hardness of LPBF AISi10Mg parts. *Materials*, v. 13, n. 10, p. 2248, 2020.
- [6] KHAN, Hamaid Mahmood et al. Influence of the post-processing operations on surface integrity of metal components produced by laser powder bed fusion additive manufacturing: a review. *Machining Science and Technology*, v. 25, n. 1, p. 118-176, 2020.
- [7] KONG, Decheng et al. Bio-functional and anti-corrosive 3D printing 316L stainless steel fabricated by selective laser melting. *Materials & Design*, v. 152, p. 88-101, 2018.
- [8] LI, Zan et al. Tensile properties, strain rate sensitivity, and activation volume of additively manufactured 316L stainless steels. *International Journal of Plasticity*, v. 120, p. 395-410, 2019.
- [9] SERRANO-MUNOZ, Itziar et al. Scanning manufacturing parameters determining the residual stress state in LPBF IN718 small parts. *Advanced engineering materials*, v. 23, n. 7, p. 2100158, 2021.
- [10] YAZDANPANA, Arshad et al. Correlation of Lack of Fusion Pores with Stress Corrosion Cracking Susceptibility of LPBF 316L: Effect of Surface Residual Stresses. *Materials*, v. 15, n. 20, p. 7151, 2022.
- [11] ZHANG, Changchun et al. Effect of heat treatments on fatigue property of selective laser melting AISi10Mg. *International Journal of Fatigue*, v. 116, p. 513-522, 2018.



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil
26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

Utilização de manufatura aditiva com soldagem robotizada aplicada em recuperação de ferramentas de mineração.

Rodrigo Concer ⁽¹⁾
Anderson Daleffe ⁽²⁾
Daniel Fritzen ⁽³⁾
Gilson Demarch ⁽⁴⁾

RESUMO

As ferramentas de mineração, como brocas, pás e dentes de escavadeiras, estão sujeitas a um ambiente extremamente severo, onde a abrasão, a corrosão e os impactos constantes geram desgaste e inevitavelmente à quebra e a substituição dessas ferramentas por novas implica em altos custos para o processo. No entanto, é possível reconstruir e reparar essas ferramentas através de manufatura aditiva com soldagem de arco de arame. Associando esse processo à um braço robótico, atribuindo maior controle e precisão no processo de soldagem, com deposição homogênea de material. O resultado é a viabilidade de fabricação de ferramentas uma maior durabilidade proporcionando uma redução na frequência de manutenções. O estudo realizou ensaios para analisar as ferramentas fabricadas por manufatura aditiva com soldagem robotizada. Ensaios de desgastes e dureza na região soldada, foram realizados com o objetivo de comprovar a eficiência do processo. Ensaios metalográficos, permitiram identificar a uniformidade das camadas de deposição no processo de soldagem. Também, se analisou a Zona Termicamente Afetada para identificar possíveis falhas, e assim garantir a eficiência da ferramenta fabricada. A utilização da soldagem robotizada também proporciona uma melhoria na qualidade e na resistência das ferramentas recuperadas. Além disso, a rápida disponibilidade de peças reparadas minimiza o tempo de inatividade da operação, garantindo a continuidade da produção. É uma solução que impulsiona a produtividade e a sustentabilidade na indústria de mineração. Assim, as empresas podem maximizar o uso de seus recursos,

⁽¹⁾ Mestrando em Engenharia Metalúrgica, Centro Universitário UniSATC, E-mail: rodrigoconcer@gmail.com

⁽²⁾ Prof. Dr. Eng. Centro Universitário UniSATC. E-mail: anderson.daleffe@satc.edu.br;

⁽³⁾ Prof. Dr. Eng. Centro Universitário UniSATC. E-mail: daniel.fritzen@satc.edu.br;

⁽⁴⁾ Prof. Centro Universitário UniSATC. E-mail: gilson.demarch@satc.edu.br;

prolongar a vida útil das ferramentas e reduzir o impacto ambiental causado pela produção de novos equipamentos.

Palavras Chaves — Manufatura Aditiva, Soldagem Robotizada, Bits de Mineração, Arame alta resistência

1. INTRODUÇÃO

O projeto visa contribuir com o desenvolvimento tecnológico da indústria de Santa Catarina, através do estudo e domínio da técnica de manufatura aditiva, com o objetivo de recuperar materiais e agregar valor ao setor carbonífero e seus insumos. A tecnologia de impressão 3D (manufatura aditiva) aplicada à indústria do carvão busca impulsionar a criação de novos mercados e negócios neste segmento, colabora para o despertar de novas startups no ecossistema de inovação catarinense, e formar massa crítica pelo domínio desta técnica de processamento que está em forte ampliação e crescimento, sendo um dos pilares da indústria 4.0.

A extração do carvão utiliza mineradores contínuo que possuem aproximadamente 100 ferramentas ou pontas, chamados de bits. O desgaste excessivo dos bits traz uma demanda altíssima de um processo otimizado para sua recuperação, do contrário, as empresas fazem a substituição por bits novos descartando os já deteriorados.

A ferramenta tem seu corpo fabricado em aço 1045 para garantir a durabilidade necessária para a operação. Já a ponta, possui um bit de aço rápido soldado a ela, que acrescenta maior resistência à desgastes e à altas temperaturas decorrentes do trabalho solicitada no processo de escavação.

A aplicação da técnica construtiva com manufatura aditiva no processo de recuperação, tem como objetivo agilizar e padronizar essa recuperação e viabilizar economicamente esse método, podendo ser adotado pelas empresas mineradoras como uma opção para suprir suas demandas.

2. MANUFATURA ADITIVA

Manufatura Aditiva (MA ou Additive Manufacturing – AM) é um processo de união de materiais, utilizado para fabricar peças, a partir de dados de um modelo tridimensional, normalmente por meio de uma abordagem camada sobre camada (ISO/ASTM 52900, 2015). Diferentemente de outros processos, como na usinagem onde há a remoção de material para se chegar à geometria desejada, na Manufatura Aditiva ocorre a adição de material, depositando camada a camada até se chegar à forma final.

A MA se desenvolveu bastante desde a introdução na indústria em 1986. Isso ocorreu devido suas vantagens, já que se torna atrativa quando o custo do material é alto, ou quando a peça tem uma geometria complexa e quando muito material precisa ser removido. Outra vantagem a ser destacada refere-se ao tempo de comercialização do produto, que pode ser diminuído significativamente devido à redução ou até eliminação de etapas, como usinagem e montagem das peças (TOWNSEND, 2016), assim como a eliminação de moldes (ZHANG, 2018).

As aplicações para a MA são várias. Em implantes médicos, na indústria aeroespacial (DEBROY, 2018), indústria automotiva, artes, personalizações, como criar um quadro de bicicleta com formato diferente, entre outras (MILEWSKI, 2017). Algumas aplicações são de grande risco, o que exige que o processo de fabricação seja livre de falhas, o que nos mostra que a MA já teve uma grande evolução.

Os processos de Manufatura Aditiva se enquadram em sete categorias segundo a ASTM F2792: *binder jetting*, *directed energy deposition* (deposição com energia direcionada), material extrusion,

material jetting, powder bed fusion (leito em pó), sheet lamination e vat photopolymerization. A Tabela 1 resume os processos de manufatura aditiva em função dos materiais possíveis de processar. Os processos mais usados para a deposição de metais são directed energy deposition (DED) e powder bed fusion (PBF). Enquanto no primeiro a energia é utilizada para fundir o material (na forma de arame ou pó) a medida em que ele é depositado, no segundo processo o material (pó) é depositado e posteriormente a fonte de calor funde seletivamente as partículas depositadas. O processo PBF tem como vantagem principal em relação a DED a precisão dimensional, não sendo necessário, na maioria das vezes, tratamento superficial subsequente, mas perde no tempo de produção e no volume da peça a ser fabricada (DEBROY, 2018).

Tabela 1: Processos de Manufatura Aditiva (ALBERTI et al., 2014)

Processo	Descrição	Método	Material
Fotopolimerização	Um polímero fotocurável é curado seletivamente usando uma fonte de luz	Laser	Polímero fotocurável
Modelagem por extrusão	Material é depositado de forma seletiva através de um cabeçote extrusor	Aquecimento por uma resistência elétrica	Polímeros, cerâmicas e metais
Fusão de pó pré-depositado	Um feixe eletrônico funde seletivamente regiões de um leito com pó pré-depositado	Laser e feixe de elétrons	Polímeros, cerâmicas e metais
Cladding 3D	O material de adição na forma de pós é injetado diretamente no feixe/poça	Laser e PTA	Metais e cerâmicas
Arco elétrico	Fonte de energia é um arco elétrico que funde o material de adição (pó/arame)	PTA, Plasma, arame, TIG, MIG/MAG	Metais

Entre esses, destacam-se os processos a arco, que usam os processos TIG, MIG/MAG ou Plasma, usando arame como material a ser depositado. Surge, então, a Manufatura Aditiva por Deposição a Arco - MADA (do inglês, Wire Arc Additive Manufacturing - WAAM). A MADA se tornou uma alternativa promissora à manufatura subtrativa na fabricação de grandes componentes de geometria complexa e no uso de materiais mais caros. Os processos de MADA geralmente envolvem altas tensões residuais e distorções devido ao alto calor fornecido e as altas taxas de deposição. A influência de algumas condições de processo, como taxa de alimentação, velocidade de soldagem, padrões de deposição e sequência de deposição, no ciclo térmico e nas tensões residuais ainda precisam ser melhor compreendidos.

Uma das maiores vantagens da Manufatura Aditiva por Deposição a Arco, a elevada taxa de deposição, é acompanhada por elevado aporte térmico, que pode ocasionar acúmulo de calor, causando problemas na deposição da peça. À medida que as camadas vão sendo depositadas, o acúmulo de calor passa a ser mais significativo (YANG, 2017). E esse acúmulo de calor apresenta vários impactos em MADA, como o aumento na largura do cordão, alterações geométricas e oxidação excessiva, além de alterações metalúrgicas (WU, 2017).

3.PROCESSO MIG/MAG

O processo Gas Metal Arc Welding – GMAW (nomenclatura usada pela American Welding Society), também conhecido como MIG/MAG, é o processo de soldagem mais usado nas indústrias devido a

sua versatilidade e suas vantagens específicas como taxa de deposição, baixo custo, operação simples e fácil automação (WANG, 2016).

Com uma correta parametrização, a soldagem MIG/MAG pode ser aplicada em todas as posições, proporcionando estabilidade de arco, altas velocidades de soldagem, e podendo ser utilizada em diferentes metais e ligas.

As principais vantagens do processo MIG/MAG são a relativamente elevada taxa de fusão do arame-eletrodo, a possibilidade de variar o modo em que a transferência metálica ocorre, o que permite soldar em diferentes posições, e a portabilidade da tocha, de baixa massa e fácil de manusear. Entre as dificuldades é possível citar uma alta emissão de calor e luz, a relativa dificuldade de manuseio do equipamento como um todo em comparação ao processo de eletrodo revestido, e o conhecimento para se regular os parâmetros de soldagem (SCOTTI E PONOMAREV 2014).

4. ARAME TUBULAR Q 71 RC DG

O material utilizado no corpo é um arame tubular com proteção gasosa, básico-rutílico, aplicável para soldagem em todas as posições nos processos semiautomáticos e automáticos. Possui ótima soldabilidade e fácil operação por parte do soldador, desenvolvido para soldagem de materiais em aço carbono, utilizando como um gás de proteção 100% CO₂ ou 75% de Ar e 25% de CO₂.

O Arame utilizado segue padrões da norma AWS E71T-1M conforme AWS A5.20. O diâmetro do arame é 1,2mm e possui a composição química conforme apresentado na Tabela 2:

Tabela 2: Composição Química Típica (AWS E71T-1M)

Chemical element	100% CO ₂	75% Ar s 25% CO ₂
Carbono (%)	0,04	0,05
Manganês (%)	1,30	1,50
Silício (%)	0,40	0,50
Enxofre (%)	0,01	0,01
Fósforo (%)	0,01	0,01

As propriedades mecânicas do material utilizado são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Propriedade Mecânica Típica (AWS A5.20)

Propriedade Mecânica	100% CO ₂	75% Ar s 25% CO ₂
Escoamento (MPa)	460	600
Resistência (MPa)	540	540
Alongamento (%)	28	27
Impacto -20°C (J)	125	135
Impacto -30°C (J)	110	130

5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O estudo realizou ensaio metalográfico na amostra fabricada através do processo de manufatura aditiva. E ensaio tem como objetivo de investigar o resultado obtido com deposição do arame sobre o material base, criando evidências que possam comprovar a eficiência da aplicação desse processo de fabricação.

Além do ensaio metalográfico, o ensaio de dureza foi realizado para evidenciar o resultado alcançado com a camada depositada, com o objetivo de avaliar e validar o material para essa aplicação específica, proposta para o estudo.

5.1 Preparação da amostra

Para realização dos ensaios, a amostra foi preparada através de manufatura aditiva com o processo de soldagem (Wire Arc Additive Manufacturing – WAAM). Os equipamentos utilizados para a fabricação foram uma máquina de solda Lincoln Electric e um robô YASKAWA. (Figura 1 e Figura 2)

O processo utilizado para a fabricação segue os princípios do processo de manufatura aditiva onde a deposição do material é realizada camada a camada. Nesse caso específico, a amostra teve apenas uma camada de deposição, pois o objetivo é identificar as características da camada depositada e comparar esses resultados com as características do material base, ou seja, o bits.



Figura 1: Lincoln Electric Power Wave E 500.



Figura 2: Robô YASKAWA YRC100 – AR1440.

Para fabricação da amostra, o bits foi fixado em um dispositivo na bancada da célula de trabalho do robô e posicionado horizontalmente para que a deposição do material fosse realizada em linha reta iniciada no meio da parte cônica da peça e finalizada na ponta. (Figura 3).



Figura 3: Montagem da célula de manufatura aditiva.

Esse percurso de deposição foi repetido por mais 12 vezes realizando a cobertura de metade da superfície da ponta do bits, conforme identificado na Figura 4.



Figura 4: Demonstração da deposição a ser realizada.

O robô realizou o processo de manufatura aditiva conforme a programação inserida previamente. Além dos dados de posição e percurso, o ajuste dos parâmetros de soldagem também são inseridos na programação. Assim, o robô segue os comandos e executa as ações com precisão e o resultado pode ser visto na Figura 5.



Figura 5: Bits com deposição realizada por manufatura aditiva.

Após alguns testes de deposição do arame no material base, definimos os parâmetros para a melhor condição e melhor resultado. Os parâmetros de soldagem utilizados na programação são identificados na Tabela 4:

Tabela 4: Parâmetros usados da programação

Parâmetros	Máquina de solda
	Valores
Tensão (V)	20
Velocidade Alimentação do Arame (in/min)	65
Vazão gás de proteção (l/min)	14
Taxa de deposição (Kg/h)	2,5

6.RESULTADOS

A análise metalográfica envolve a preparação de amostra de precisam ser então observadas sob um microscópio metalográfico. O processo de preparação inclui etapas como corte, lixamento, polimento e ataque químico. Cada uma dessas etapas é realizada com precisão para revelar a estrutura interna do material de interesse, desde a superfície até as regiões mais profundas.

A Figura 6, mostra o corpo de prova com o ataque químico realizado e já preparado para a análise metalográfica.



Figura 6: Amostra preparada para ensaios.

Ao observar a amostra sob um microscópio, é possível identificar várias características importantes. A estrutura cristalina dos metais, conhecida como grãos, pode ser visualizada, permitindo a análise do tamanho, forma e orientação dos grãos. As interfaces entre os grãos, chamadas de contornos de grão, também são avaliadas, pois têm um impacto significativo nas propriedades mecânicas do material.

A amostra apresentou a presença de contendo finas lamelas de ferrita nos contornos de grão e colônias de perlita localizada na região do material base. Verifica-se que o tamanho de grão nesta microestrutura é relativamente menor, assemelhando-se a microestrutura padrão do aço SAE 1045.

Já na região da camada depositada percebe-se uma estrutura, de características típicas de materiais de baixa liga, ou seja, baixo teor de carbono. Isso pode ser facilmente percebido nas figuras abaixo. (Figura 7 e 8). Fica evidente, também, algumas inclusões devido a impureza depositadas durante a

soldagem. Essa característica é comum em processo de soldagem utilizando arames tubulares onde há formação de carepa. Logo, como as deposição dos cordões de solda são próximas, essas impurezas ficam entre os cordões.

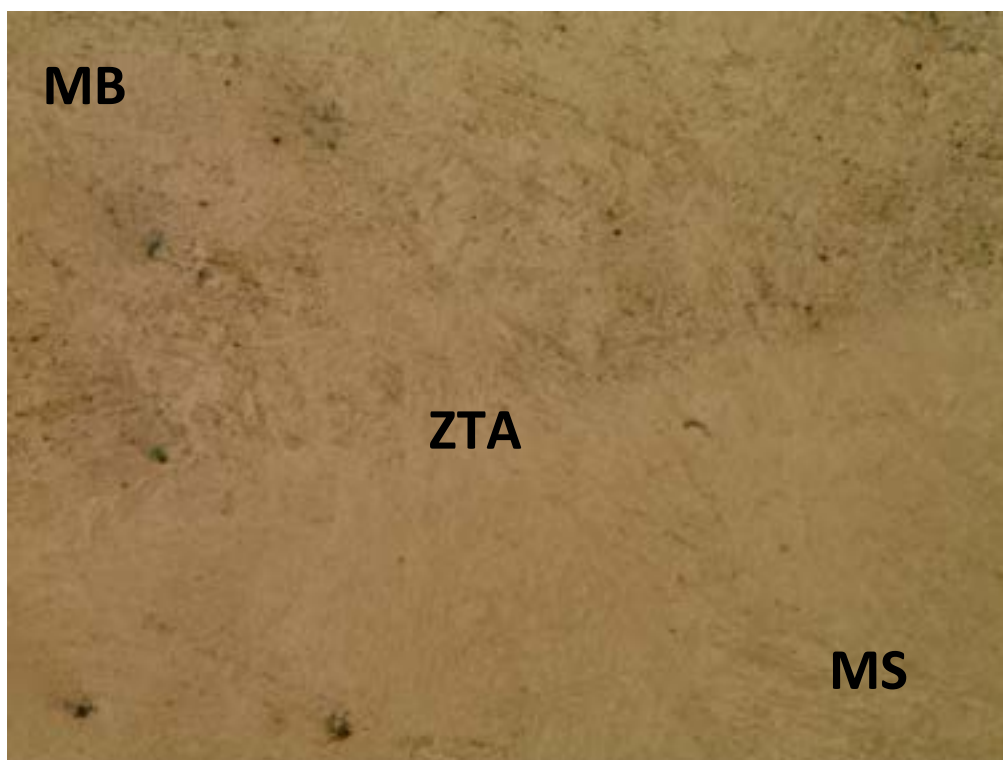


Figura 7: Amostra com ampliação de 500x.

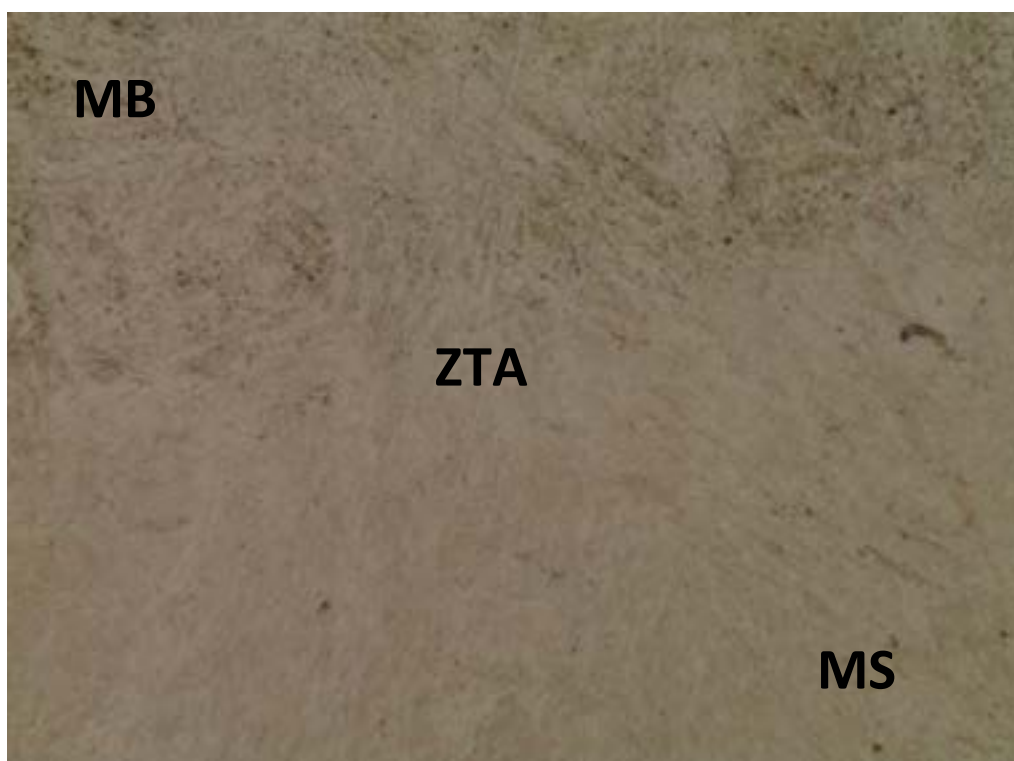


Figura 8: Amostra com ampliação de 1000x.

Percebe-se, tanto na Figura 7 quanto na Figura 8, que a zona termicamente afetada (ZTA) não aparece nitidamente na amostra analisada. Isto é indicativo que a dureza do material depositado é

semelhante com a do metal base.

Essa amostra também foi submetida a um ensaio de dureza para evidenciar melhor o resultado obtido. A Figura 9 apresenta o resultado encontrado no corpo de prova. As posições do ensaio partiram do centro da amostra. Assim, pode ser feito um comparativo da dureza encontrada no corpo da ferramenta e a dureza do material aplicado na sua superfície pelo método de manufatura aditiva.

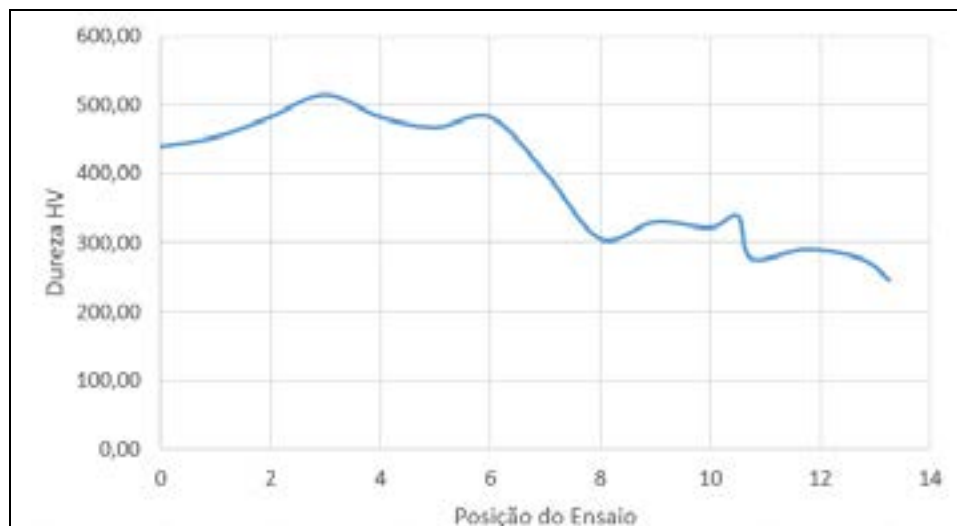


Figura 9: Resultados do ensaio de Dureza da amostra.

7 CONCLUSÕES

Após a realização da análise metalográfica, as imagens da microestrutura do material foram cuidadosamente analisadas. Essa microestrutura inclui informações sobre os grãos, suas orientações, tamanho, forma, inclusões e qualquer outra característica que possa influenciar nas propriedades mecânicas e físicas do material. Com base nas observações, as conclusões sobre o material da camada depositada não foram apropriadas para a proposta da pesquisa.

A deposição obtida no processo adotado no experimento prático elevou a temperatura do material e geralmente causa recristalização, o que significa que os grãos do material podem ser refinados ou completamente reorganizados. O tamanho do grão está relacionado com a taxa de resfriamento: taxas de resfriamento mais lentas tendem a resultar grãos na microestrutura que indicam menor resistência e tenacidade.

O objetivo desse experimento é encontrar, na camada depositada, dureza e resistência com valores superiores aos valores encontrados no metal base, comprovando e validando o material adotado no procedimento. Porém o resultado encontrado, como já mencionado anteriormente, não foi adequado a essa aplicação, sendo necessário novos testes de deposição com materiais de composição diferente para obtenção de resultados adequados.

8 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Universitário – UNISATC pelo apoio a pesquisa através do uso de sua estrutura de laboratórios e a Fundação de Amparo a Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina – FAPESC pelo apoio financeiro na compra de equipamentos e insumos para pesquisa.

9 REFERÊNCIAS

- [1] ZHANG, Z; et al. Surface quality and forming characteristics of thin-wall aluminium alloy parts manufactured by laser assisted MIG arc additive manufacturing, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, Volume 1, 2018, 89-95pp. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2018.03.005>
- [2] WANG, L. et al. Suppression of humping bead in high speed GMAW with external magnetic field, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 21, 2016, 131-139 pp. <https://doi.org/10.1179/1362171815Y.0000000074>
- [3] TOWNSEND, A; et al. Surface texture metrology for metal additive manufacturing: a review, *Precision Engineering*, Volume 46, 2016, 34–47pp. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.06.001>
- [4] MILEWSKI, J. O; Additive Manufacturing of Metals. Springer Series in Materials Science, Volume 258, 2017, 343 pp. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-58205-4>
- [5] DEBROY, T; et al. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. Elsevier, 2018, 112-224 pp. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>
- [6] YANG, D., WANG, G., ZHANG, G.; Thermal analysis for single-pass multi-layer GMAW based additive manufacturing using infrared thermography. *J. Mater. Process. Technol.* 2017, 215–224 pp. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.01.024>
- [7] WU, B., et al. Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V. *J. Mater. Process. Technol.* 250, 2017, 304–312 pp. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.07.037>
- [8] SILVA, L. J; Near-Immersion Active Cooling For Wire + Arc Additive Manufacturing: From Concept To Application, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, 140, 2019 p. <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2019.2422>



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil

26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis

12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

ESTUDO DA EFICIÊNCIA MECÂNICA DE UMA CRUZETA BIMETÁLICA OBTIDA POR MANUFATURA ADITIVA DE FUSÃO LOCALIZADA APLICADAS À TRANSMISSÕES AUTOMOTIVAS

Joélson Vieira da Silva¹

Anderson Daleffe²

Lírio Schaeffer³

Jovani Castelan⁴

Daniel Fritzen⁵

Carlos Antônio Ferreira⁶

RESUMO: O aumento da autonomia dos automóveis vem sendo objeto de estudo em diversos segmentos a fim de encontrar soluções que permitam a redução custos, de forma que os veículos automotivos alcancem um rendimento que os permitam permanecer competitivos no mercado. Paralelamente à necessidade do aumento da eficiência do ramo automotivo, o uso de alternativas de materiais multimetálicos com diferentes características vem sendo avaliados com ótimos resultados. Seguindo essa tendência, esse estudo investiga de forma preliminar, os potenciais benefícios da fabricação de uma cruzeta concebida pela combinação do núcleo em alumínio laminado e com a região externa obtida por meio de manufatura aditiva de fusão localizada. Para os ensaios, as peças amostras foram confeccionadas a partir de uma barra laminada de alumínio 6061, com a superfície externa em liga de aço carbono SAE 1020, gerados por manufatura aditiva. A investigação permitiu analisar o comportamento da união bimetálica entre esses diferentes materiais expostas em

¹ Doutorando em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M). E-mail: joelson.silva@satc.edu.br

² Professor do Centro Universitário UNISATC. E-mail: anderson.daleffe@satc.edu.br

³ Professor da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. E-mail: schaefer@ufrgs.br

⁴ Professor do Centro Universitário UNISATC. E-mail: jovani.castelan@satc.edu.br

⁵ Professor do Centro Universitário UNISATC. E-mail: daniel.fritzen@satc.edu.br

⁶ Professor do Centro Universitário UNISATC. E-mail: carlos.ferreira@satc.edu.br

condições diferentes de temperatura através de sua caracterização metalográfica obtida após o forjamento. A inovação contribui para a obtenção de dados que permitirão desenvolver projetos de elementos mecânicos com custo reduzido, mantendo as características necessárias à aplicação e que atenda as solicitações de transmissão mecânica.

Palavras-chaves: Manufatura aditiva, Componentes bimetálicos, Solda GMAW, Cruzeta, Impressão 3D

ABSTRACT: Increasing the autonomy of automobiles has been the subject of study in several segments to find solutions that allow cost reduction, so that automotive vehicles achieve a performance that allows them to remain competitive in the market. In parallel with the need to increase efficiency in the automotive sector, the use of alternative multimetallic materials with different characteristics has been evaluated with excellent results. Following this trend, this study preliminarily investigates the potential benefits of manufacturing a crosshead designed by combining the laminated aluminum core and the external region obtained through localized fusion additive manufacturing. For the tests, the sample pieces were made from a laminated bar of 6061 aluminum, with the external surface made of SAE 1020 carbon steel alloy, generated by additive manufacturing. The investigation made it possible to analyze the behavior of the bimetallic union between these different materials exposed to different temperature conditions through their metallographic characterization obtained after forging. The innovation contributes to obtaining data that will allow the development of mechanical element designs at a reduced cost, maintaining the characteristics necessary for the application and meeting mechanical transmission requests.

Keywords: Additive manufacturing, Bimetallic components, GMAW welding, Crosshead, 3D printing

1. INTRODUÇÃO

A indústria automobilística e aeroespacial tem buscado uma redução no consumo de combustível, e emissão de carbono tendo em vista a exigência e percepção dos clientes e requisitos legislativos que atualmente já estabelecem metas de transição dos veículos movidos a combustão para elétricos.

Algumas limitações ainda inibem essa transformação, como a autonomia dos automóveis que está relacionada diretamente ao peso do veículo. Para que essa transformação seja realizada de maneira apropriada, várias áreas tentam desenvolver tecnologias adequadas, como aumentar a eficiência das baterias e redução do peso, que pode ser obtida com a substituição do material utilizado (POLITIS, 2014).

A expressão Manufatura Aditiva (MA), também conhecida por Prototipagem Rápida, refere-se a processos de fabricação que proporcionam uma rápida criação de um modelo básico, ou de um protótipo a partir do qual outros modelos e o próprio produto em sua versão final serão obtidos [GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2014]. Esse método é considerado

inovador e reduz substancialmente o tempo de fabricação de modelos e partes de protótipos, além da redução também da taxa de erro durante o processo produtivo [GARCIA, 2016].

A modificação no projeto dos componentes existentes em veículos e aeronaves vêm tendo um melhor rendimento, substituindo material de alto desempenho em áreas não críticas por materiais alternativos com menor massa, mantendo o material de alto desempenho apenas nas regiões mais críticas (POLITIS, 2018).

A presente proposta considera a fabricação de uma cruzeta bimetálica utilizando composta por uma liga de aço carbono na região externa, obtida por manufatura aditiva, juntamente com uma liga de alumínio no interior do componente.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a fabricação das peças de teste, foram confeccionadas amostras, utilizando a máquina de solda Lincoln Electric, modelo YRC1000 AR1440 Power Wave E600, do fabricante Yaskawa, conforme pode ser visto na Fig.1.



Figura 1: Máquina de solda utilizada
Fonte: do autor (2023)

O projeto segue as dimensões aproximadas representadas na Fig.2a e a matriz utilizada pode ser vista na Fig. 2b.

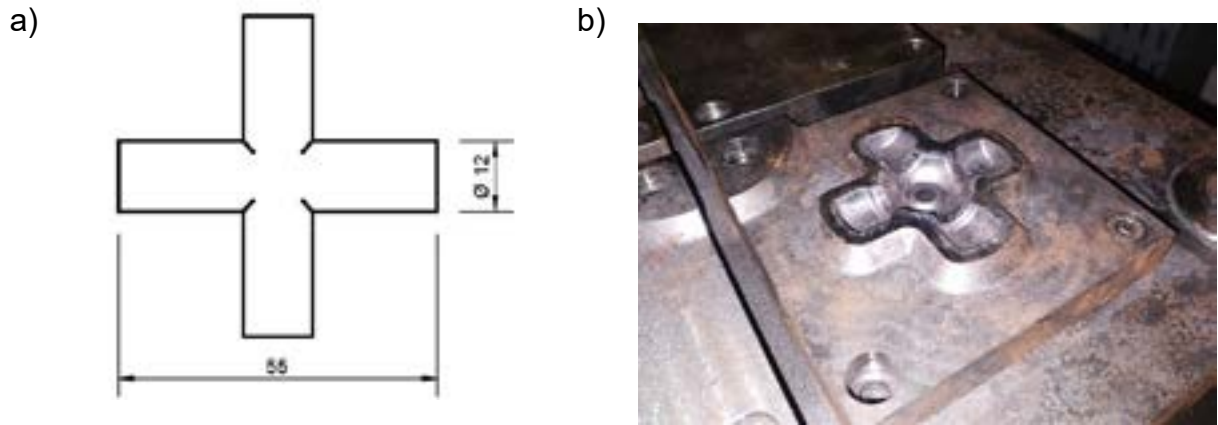


Figura 2: Dimensões pretendidas da peça final (a) e matriz de forjamento (b)
Fonte: do autor (2023)

Na Tab. 1 é exibida a composição química dos materiais em estudo:

Tabela 1: Composição química dos componentes

Material	Al	Mg	Si	Mn	Ti	Zn	Cu	Fe
AA6061	97,42	0,92	0,63	0,01	0,013	0,02	0,29	0,20
Material	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
SAE 1020	0,14	0,50	0,14	0,030	0,022	0,03	0,00	0,020

Foram confeccionadas oito amostras, para posterior preenchimento com alumínio por forjamento a quente, conforme pode ser observado na Fig. 3a e 3b.

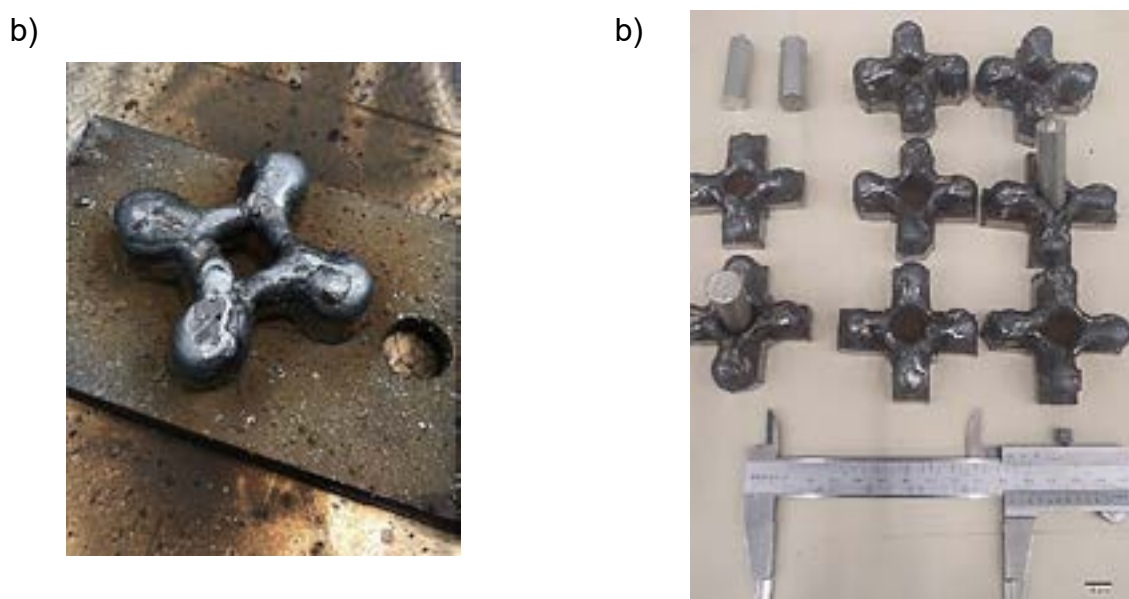


Figura 3: a) Parte externa da cruzeta. b) amostras impressas e tarugos antes do forjamento
Fonte: do autor (2023)

Nesse estudo, a montagem foi realizada efetuando combinações de temperaturas de acordo com a Tab. 2. Foi optada pela temperatura de 550 °C devido ao baixo ponto de fusão da liga de alumínio.

Tabela 2: Faixa de temperatura aplicada às amostras

AMOSTRA	Corpo externo (Aço)	Núcleo (Alumínio)
01	A frio	A frio
02	A frio	A frio
03	550 °C	550 °C
04	550 °C	550 °C
05	A frio	550 °C
06	A frio	550 °C
07	550 °C	A frio
08	550 °C	A frio

O forjamento foi efetuado em uma única etapa utilizado uma prensa hidráulica com capacidade de 100 toneladas pertencente ao laboratório de conformação mecânica da Unisatc, possibilitando dar forma final ao componente a ser estudado. Na Fig. 4 podemos observar as cruzetas em sua versão após o forjamento a quente em diferentes combinações de temperaturas.

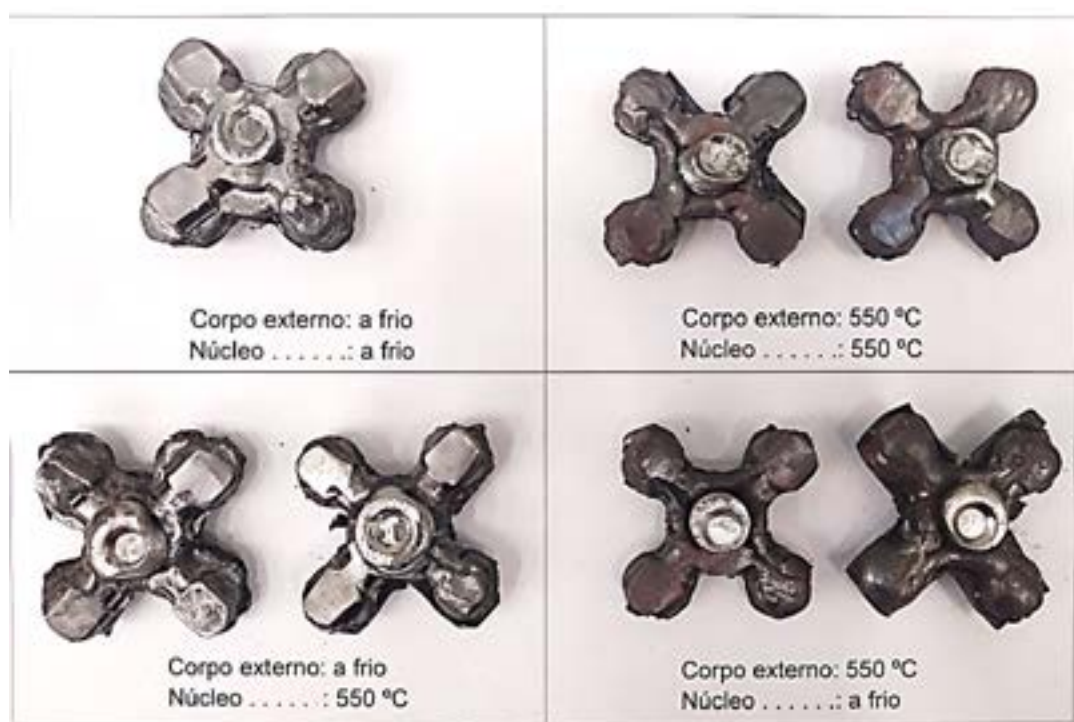


Figura 4: Montagem da cruzeta
Fonte: do autor (2023)

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente, para essa proposta, as amostras 03 e 04, 05 e 06 foram selecionadas para a sequência de ensaios, considerando as melhores junções entre os materiais, analisando visualmente. Devido ao limite da prensa, 100 toneladas, não foi possível promover um encaixe adequado entre todas as peças de teste, permanecendo lacunas entre os dois materiais, conforme pode ser visto na Fig. 5.



Figura 5: Amostra (01) com imperfeições no encaixe

Fonte: do autor (2023)

Observando as análises metalográficas, pode-se perceber que a temperatura relativamente baixa para o aço carbono não promoveu grandes alterações nos constituintes de sua estrutura, como pode ser visto na Fig. 6.

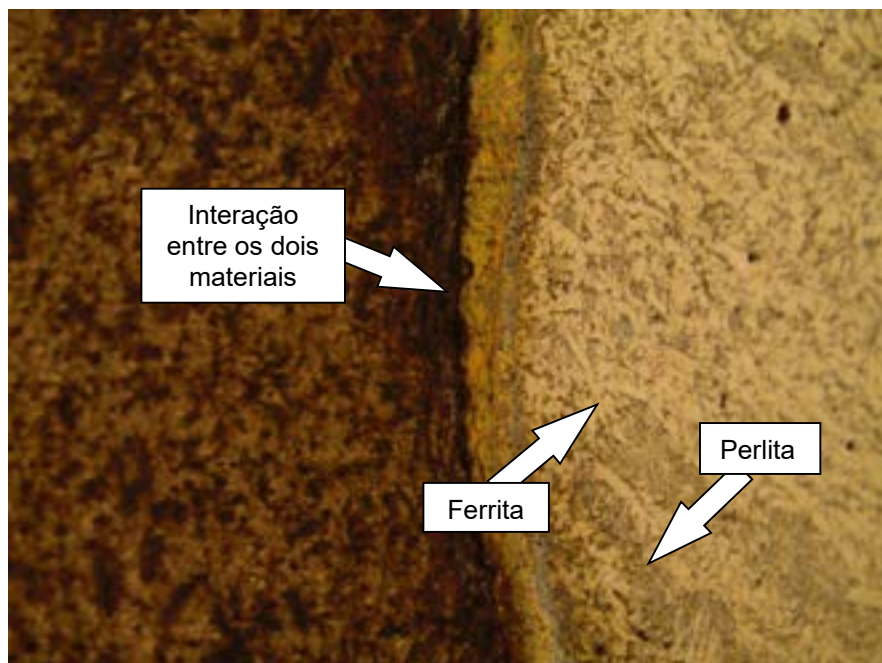


Figura 6: Micrografia da amostra 04 atacado com nital 2 %. Aumento: 100x

Fonte: do autor (2023)

A medição de dureza foi efetuada à 15 mm das extremidades para o centro, com intervalos de 1,5 mm, conforme esquema ilustrado na Fig. 7.



Figura 7: Representação do procedimento utilizado para medições das durezas
Fonte: do autor (2023)

Após medição da dureza em escala Vickers, chegou-se aos resultados indicados na Tab. 3 realizados ao longo de 25 pontos distribuídos linearmente ao longo do perfil das amostras.

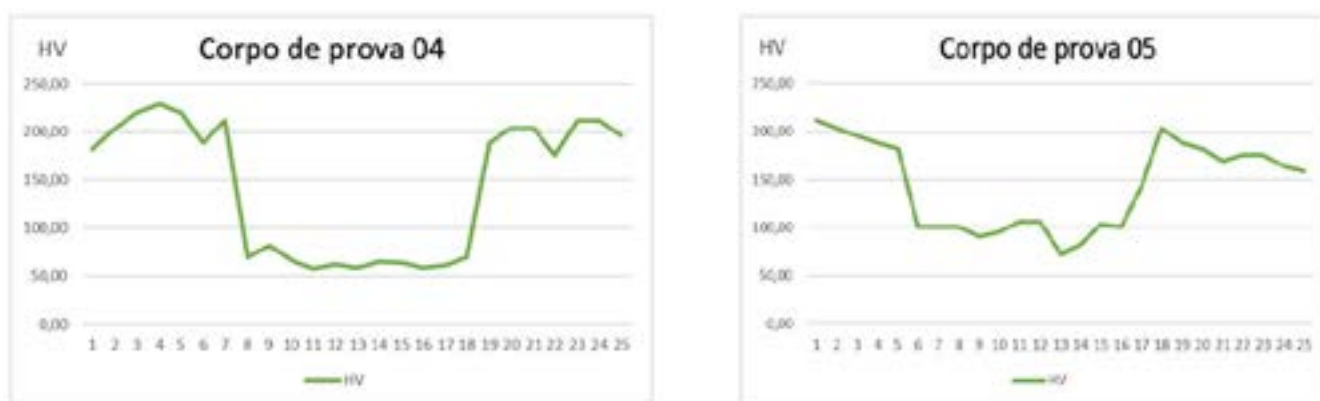


Figura 8: Medições de dureza das amostras 04 e 05
Fonte: do autor (2023)

De acordo com os gráficos de dureza, pode ser constatado uma similaridade em consequência de as medições iniciarem na superfície da liga SAE 1020, com uma dureza apresentada em torno de 200 HV, percorrendo o centro de alumínio com dureza média de 80 HV e, retornando novamente à superfície de aço. Analisando os valores individualmente, nota-se que os limites de dureza tiveram maior oscilação na amostra 05 em que apenas o núcleo foi aquecido a 550 °C.

As demais amostras forjadas tiveram uma junção satisfatória nas condições analisadas, sem apresentar tricas ou danos superficiais. Essa combinação resultou em uma

redução de peso de 10 % em relação a peça elaborada exclusivamente em aço carbono, pelo método de deposição.

5. CONCLUSÕES

Este estudo teve o propósito de investigar preliminarmente o forjamento de uma cruzeta bimetálica desenvolvida a partir de um corpo em liga de aço SAE 1020 formado por manufatura aditiva, e o núcleo em alumínio AA6061. A análise experimental possibilitou concluir que:

- O forjamento da cruzeta com ambos os elementos a temperatura de 500 °C e com apenas o núcleo aquecido, mantiveram as principais características metalográficas.
- A união entre os dois materiais apresentou visualmente uma boa adesão, sem trincas ou danos.
- A redução de peso alcançado pela cruzeta bimetálica foi de 10 % em relação ao material produzido integralmente em SAE 1020 pelo método de deposição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] POLITIS, D.J., Lin, J., Dean, T.A., Balint, D.S. **An Investigation into the Forging of Bi-metal Gears**. Journal of Materials Processing Technology. 2014.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.04.020>

[2] GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. Additive Manufacturing Technologies. 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. New York: Springer, 2014.

[3] GARCIA, L.H.T. Desenvolvimento de processo de fabricação de compósitos de fibras longas através da tecnologia de Manufatura Aditiva. Tese de Doutorado. Engenharia Mecânica. Universidade de São Paulo. São Carlos. 2016.

[4] POLITIS, D.J. **An Analysis of the Tooth Stress Distribution of Forged Bi-metallic Gears**. Journal Mechanical Engineering Science. Vol. 232(1) 124–139. 2018



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil
26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de
Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG
25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming
Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental
Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

Uso da manufatura aditiva por fusão localizada na recuperação de estampo para indústria cerâmica

Ramon José¹
Carlos Antônio Ferreira²
Gilson De March³
Daniel Fritzen⁴
Anderson Daleffe⁵
Lirio Schaeffer⁶

RESUMO

Dentre os processos de Manufatura Aditiva (MA) a técnica de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) é aplicada nas operações de reparo de peças e componentes metálicos. É uma tecnologia baseada na fusão, conhecida por sua alta taxa de deposição, baixo desperdício de matéria-prima, o que torna um processo de fabricação econômico, podendo ser empregado em peças de médio e grande porte. Uma das grandes diretrizes do MADA é o reparo de peças provenientes dos processos produtivos. No setor cerâmico, na etapa de prensagem do porcelanato ocorre o desgaste prematuro nas lastrinas que revestem a cavidade da caixa matriz, esse desgaste está associado ao uso de massa (pó atomizado) altamente abrasivo devido ao teor de matérias-primas de natureza feldspáticas. Este estudo tem como objetivo principal comparar duas condições diferentes de trajetória de deposição do revestimento duro em areme tubular UTP AF Dur 600 via processo MADA em corpos de prova com substrato base fabricado em aço SAE 1045. A análise de desgaste dos corpos de prova foi realizada por meio do ensaio em abrasômetro roda de borracha em areia seca seguindo a norma ASTM G65, efetuando um comparativo quanto a resistência a abrasão. Desta forma, este trabalho consolida-se com uma revisão do estado da arte da Manufatura Aditiva por Deposição a Arco, aprimorado com os conceitos do objeto de estudo, avaliando a sua resistência ao desgaste abrasivo com base no plano de trajetória de deposição.

Palavras-chave: Manufatura aditiva por deposição a arco, desgaste abrasivo, revestimento UTP AF Dur 600

1. INTRODUÇÃO

Entre todos os produtos fabricados no setor cerâmico o porcelanato técnico lidera como produto com maior avanço tecnológico, pois envolve alta tecnologia com aplicação de matérias-primas de alta qualidade e parâmetros operacionais de extrema relevância, tais como: pressão de conformação entre 35-45 MPa e uma temperatura de queima aproximadamente de 1200°C [1].

¹ Mestrando – PPGEM-UniSatc: joseramon10@hotmail.com

² Mestrando – PPGEM-UniSatc: carlos.ferreira@satc.edu.br

³ Mestrando – PPGEM-UniSatc: gilson.march@satc.edu.br

⁴ Professor – PPGEM-UniSatc: daniel.fritzen@satc.edu.br

⁵ Professor – PPGEM-UniSatc: anderson.daleffe@satc.edu.br

⁶ Professor – PPGEM / LdTM UFRGS: schaefer@ufrgs.br

No processo de fabricação de produtos cerâmicos o porcelanato técnico exige várias etapas, onde, na etapa de prensagem em prensas hidráulicas, se faz necessário o uso de matrizes que conferem a forma geométrica exata do produto cerâmico. A cavidade da matriz é preenchida com pó atomizado (massa) que tem em sua formulação concentração de matérias-primas de natureza feldspáticas, que por sua vez, é altamente abrasiva. A abrasividade acelera o desgaste nas caixas matriz inferior, que possui duas partes principais: a caixa matriz, que tem formato retangular e são fabricadas em aço 1045 e a cavidade, que tem o formato da bitola do revestimento cerâmico, esta cavidade é revestida pelas lastrinas que são fabricadas com aço ferramenta AISI D6 [2].

O aço AISI D6 utilizado na fabricação das lastrinas é padrão e o provável desgaste está associada com a abrasividade do pó atomizado. Por conta dessa condição, a recuperação das lastrinas por meio da Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) mostra-se um processo viável.

Desta forma, esta pesquisa visa comparar a influência de duas trajetórias diferentes de deposição do revestimento duro em arame tubular UTP AF Dur 600 via processo MADA, em corpos de prova com substrato base fabricado em aço SAE 1045. A análise de desgaste dos corpos de prova será por meio do ensaio em abrasômetro roda de borracha em areia seca, conforme a norma ASTM G65, além dos ensaios de rugosidade superficial, dureza Vickers e metalografia do corpo de prova.

2. MANUFATURA ADITIVA

O processo de fabricação de manufatura aditiva é definido por adicionar e unir materiais em camadas para obter peças com base em desenhos tridimensionais (3D) auxiliado por computadores (CAD), tecnologia que difere das metodologias convencionais de fabricação subtrativa e formativa [3].

2.1 MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO (MADA)

A MADA é uma tecnologia MA baseada na fusão e conhecida por sua alta taxa de deposição, baixo desperdício de material, é um processo de fabricação econômico indicado para o reparo e/ou fabricação de componentes metálicos de médio a grande porte [4].

A técnica MADA se beneficia de um braço robótico controlado por computador, uma fonte de energia de soldagem, uma tocha de soldagem e um sistema de alimentação de arame para fabricar peças metálicas aditivamente na forma de cordões de solda sobrepostos em camadas previamente depositadas [5], [6].

A entrada excessiva de energia, a alta taxa de deposição e o elevado gradiente de temperatura aplicados durante o processo de MA alimentado por matéria-prima na forma de fio/arame, contribuem para formação de tensões residuais e distorções, portanto, nos processos de soldagem da manufatura aditiva por deposição a arco, vários parâmetros devem ser pautados, tais como: tensão do arco, corrente de soldagem, velocidade de deslocamento, taxa de alimentação de arame, distância de trabalho e estratégia de deposição ou planejamento e direcionamento de deposição [7].

O processo MIG/MAG (*Metal Inert Gas /Metal Active Gas*) é uma das energias de soldagem utilizada como fonte de calor usada no processo MADA [8].

2.2 PROCESSO MIG/MAG

No processo MIG/MAG o fio ou arame é utilizado como um eletrodo consumível, onde, o arco gerado entre o fio e a peça de trabalho funde o fio consumível e deposita o material fundido na superfície do substrato. O processo GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) consiste em gás inerte metálico (MIG) e gás ativo metálico (MAG). No processo MIG, um gás não reativo (inerte), é usado, como o hélio ou argônio, aplicando-se principalmente para metais não ferrosos. Para o processo MAG é utilizado dióxido de carbono ou uma mistura de gases inertes, ou seja, um tri mix de Ar + CO₂ + O₂, para fins de blindagem. Sua aplicação se dá principalmente para metais ferrosos [9].

Para realização da pesquisa os corpos de prova foram fabricados em aço SAE 1045 na Tabela 1 está descrito o percentual de cada elemento químico presente.

Tabela 1: Composição química SAE-J403-14-1045 [10].

Composição química	Percentual (%)
Carbono	0,470
Silício	0,240
Manganês	0,610
Fosforo	0,011
Enxofre	0,003
Alumínio	0,027
Cromo	0,010

O material utilizado para revestimento dos corpos de prova via processo MADA foi o arame tubular UTP AF Dur 600, esse material é indicado para revestimento de componentes sujeitos à compressão, fricção e impacto, como as mandíbulas de britador, ferramentas de corte e a recuperação de matrizes na fabricação de azulejos [11]. Na Tabela 2 está descrito o percentual de cada elemento químico presente no arame tubular UTP AF Dur 600, na Tabela 3 podemos observar os parâmetros operacionais.

Tabela 2: Composição química do revestimento duro em arame tubular UTP AF Dur 600 (DIN 8555 MF 6-GF-60) [11].

Composição química	Percentual (%)
Carbono	0,600
Silício	1,200
Manganês	1,300
Cromo	6,700
Molibdênio	0,650
Titânio	0,030

Tabela 3: Parâmetros operacionais do revestimento duro em arame tubular UTP AF Dur 600 [11].

Parâmetros	UTP AF DUR 600
Diâmetro arame	12 mm
Voltagem	25 – 34 (V)
Corrente	150 – 300 (A)
Dureza	55 – 60 HRC
Gás de proteção	100% CO ₂ ou Argônio + 25% CO ₂
Peso	15 Kg

2.3 DESGASTE

A norma DIN 50320 de 1979 define desgaste como a perda progressiva de material da superfície de um corpo sólido devido à ação mecânica, isto é, o contato e movimento relativo de um corpo sólido contra um corpo sólido, líquido ou gasoso. Dentre os processos de desgastes o classificado por abrasão é o que será pautado no estudo em questão [12]. O desgaste abrasivo pode ocorrer de duas formas: abrasão a dois corpos e abrasão a três corpos. No desgaste abrasivo a dois corpos, ocorre quando há um movimento de deslizamento, se caracteriza por ser uma superfície dura e rugosa. No desgaste abrasivo a três corpos, ocorre um deslizamento e rolamento de partículas que podem ser duras e abrasivas [13].

A norma ASTM G65 - Ensaio de abrasão usando Areia Seca em Roda de Borracha define os procedimentos, métodos, condições, tipos de areia abrasiva e construção do equipamento. Este ensaio tem como objetivo determinar a resistência ao desgaste abrasivo em materiais metálicos e não metálicos. O resultado do teste é demonstrado em perda de volume [14].

2.4 MATRIZ PARA INDÚSTRIA CERÂMICA

No processo cerâmico o setor de modelagem corresponde à compactação da matéria prima em uma placa de material cerâmico, essa prensagem é efetuada nas prensas hidráulicas que se faz necessário o uso de estampos que garantem uma forma geométrica exata [15]. Na etapa de prensagem do porcelanato ocorre o desgaste prematuro nas lastrinas que revestem a cavidade da caixa matriz, esse desgaste está associado ao uso de massa (pó atomizado) altamente abrasivo devido ao teor de

matérias-primas de natureza feldspáticas [16]. Na Figura 1 está ilustrado um estampo penetrante completo, neste tipo de estamparia, o punção superior avança no interior da cavidade da caixa matriz que se encontra rígida. Possui fácil operacionalidade, adapta-se facilmente com diversos tipos de massas e sua manutenção é simples, este conceito é atualmente o mais utilizado na indústria cerâmica [17], [18].



Figura 1: Estampo penetrante completo [18].

3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção serão descritas as etapas de realização dos experimentos necessários para a validação desta pesquisa, ordenados pelo ensaio de desgaste, análise de rugosidade superficial, análise de dureza Vickers e metalografia dos experimentos ensaiados.

3.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Para esta investigação, foram preparados 06 (seis) corpos de prova medindo 3"x1"x1/2", conforme norma ASTM G65-16, divididos igualmente em 02 (dois) grupos diferentes, conforme a trajetória de deposição do revestimento duro, sendo um grupo no sentido longitudinal e o outro no sentido transversal dos corpos de prova, conforme Figura 2.

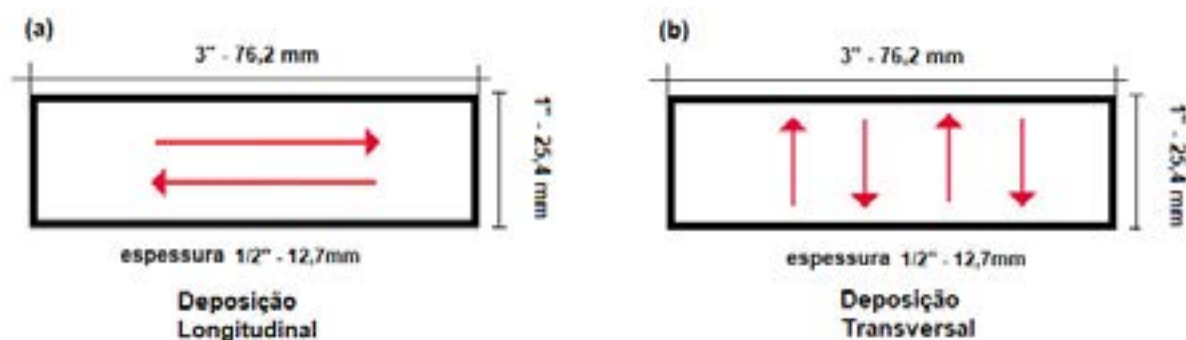


Figura 2: Trajetória de deposição do revestimento duro [Autor, 2023].

A confecção dos corpos de prova se deu com a deposição em arame tubular UTP AF Dur 600, em substratos base de SAE 1045, por meio do processo de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco. Para esta etapa, foi usado um braço robótico marca Yaskawa modelo YRC 1000 AR 1440 conforme ilustrado na Figura 3, munido da máquina de solda semiautomática da marca Lincoln Electric modelo Power Wave-E500. A programação dos movimentos robóticos se deu por meio software Motoman Linguagem C.



Figura 3: Trajetória Braço robótico marca Yaskawa modelo YRC 1000 AR 1440 [Autor, 2023].

Com os parâmetros operacionais estabelecidos o braço robótico executou os movimentos nos três eixos (X, Y e Z), incluindo o controle de movimentação da tocha que é responsável por fazer a deposição do material, camada a camada. A velocidade de avanço da máquina foi de 11 mm/s e a altura da tocha para cada camada foi de 10 mm. Para deposição do material duro sobre o substrato, foi preciso definir os parâmetros ideais do processo de deposição a arco, especificado na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros operacionais para deposição, braço robótico marca Yaskawa modelo YRC 1000 AR 1440 [Autor, 2023]

Parâmetros Operacionais	Unidades
Voltagem	20 (V)
Fluxo de gás	15 l/min
Velocidade de deposição	2032 mm/min
Gás de proteção	75% Argon + 25% CO ₂

Após a fabricação dos corpos de prova via MADA, foram retificados em uma retificadora plana de precisão Mello, P36, conforme demonstrado na Figura 4.



Figura 4: Corpos de prova retificados [Autor, 2023].

Em seguida foi efetuado a limpeza com álcool etílico 99,5%, com a finalidade de remover impurezas, gordura etc. Este procedimento de limpeza realizou-se nos corpos de prova para verificação de massa inicial, massa final após o ensaio de desgaste e para execução dos ensaios de rugosidade superficial, micro dureza e metalografia.

3.2 ENSAIO DE RUGOSIDADE

A análise de rugosidade superficial (Rz) foi realizada com um Rugosímetro, modelo Mitutoyo SJ-310. Esta análise se faz necessária, pois, para a realização do ensaio de desgaste, segundo a norma ASTM G65-16, se admite o valor de rugosidade máxima (Rz) na ordem de 0,8µm. Finalizando essa etapa, submetendo as amostras a sua massa inicial na balança analítica marca Marte modelo AUX 320.

3.3 ENSAIO DE MICRODUREZA

Para aferir a micro dureza do material base SAE 1045 e da camada do metal duro em arame tubular UTP AF Dur 600 foi utilizado um microdurômetro Shimadzu HMV-2TADW – dureza Vickers com carga de 9,807 N e com tempo de penetração de 10 segundos.

3.4 METALOGRAFIA

Para verificação da microestrutura do material foi efetuado análise metalográfica usando o microscópio Olympus modelo SC 30 – BX51M. O ensaio metalográfico foi realizado seguindo a norma ABNT NBR 15454. O ataque na parte do substrato de SAE 1045 foi feito com nital 2% por 5 segundos, enquanto na camada depositada de metal duro o ataque químico foi feito com ácido villeda por 10 segundos.

3.5 ENSAIO DE DESGASTE ABRASIVO

No laboratório de Desgaste de Superfície – LDS – SATC, foram executados os ensaios de desgaste em roda de borracha em areia seca, conforme Figura 5: Equipamento abrasômetro LDS-SATC [Autor, 2023].



Figura 5: Equipamento abrasômetro LDS-SATC [Autor, 2023].

Com base na norma ASTM G65-16 foi utilizado o procedimento “A” indicado para condições severas de classificação de materiais de média e elevada resistência a abrasão. Para execução os parâmetros de teste foram: força normal 130N, rotação da roda de borracha 200 rpm, vazão da areia 300 g/min, tipo de areia NBR 7214 N°. 100 e duração do ensaio 6089 rotações. No total de seis corpos de prova foram ensaiados.

Foram ensaiados 6 corpos de prova divididos em dois grupos de acordo com os planos de trajetória de deposição. A identificação de cada grupo seguiu a seguinte forma: amostras 1,2 e 3 com deposição longitudinal e amostras 4,5 e 6 com deposição transversal. Em sequência realizou-se o procedimento de limpeza de todas as amostras ensaiadas no abrasômetro, enfim, encaminhou-se as seis amostras para coletar os valores de massa final em balança analítica marca Marte modelo AUX 320 com precisão de quatro casas após a vírgula.

O resultado do teste é expresso em perda de volume, e calculado conforme equação 1.

$$Vp = \frac{mi - mf}{D} \times 1000 \quad (1)$$

Onde:

Vp = volume perdido (mm³);

mi = massa inicial (g);

mf = massa final (g);

D = densidade do material (g/cm³)

4. RESULTA E DISCUSSÃO

Neste tópico irá se apresentar e comparar os dados coletados em laboratório com relação as duas condições testadas, e dessa forma avaliar a resistência ao desgaste abrasivo com base no plano de trajetória de deposição.

4.1 ENSAIO DE RUGOSIDADE

Para cumprimento da norma ASTM G65 se fez necessário a execução do ensaio de rugosidade, os valores obtidos em ambos os planos de deposição apresentam valores menores a 0,8 μm , ou seja, a rugosidade obtida nas amostras está abaixo do valor estabelecido pela referida norma. Nas Tabela 5 e Tabela 6 estão apresentados os valores médios coletados em cada amostra.

Tabela 5: Resultados da análise de rugosidade superficial nos corpos de prova com deposição longitudinal [Autor, 2023].

Corpo de prova	Aferição longitudinal [μm]	Aferição transversal [μm]
1°	0,343	0,720
2°	0,293	0,707
3°	0,275	0,688
Média	0,304	0,705
Desvio Padrão	0,035	0,016

Tabela 6: Resultados da análise de rugosidade superficial nos corpos de prova com deposição transversal [Autor, 2023].

Corpo de prova	Aferição longitudinal [μm]	Aferição transversal [μm]
1°	0,266	0,635
2°	0,227	0,630
3°	0,251	0,645
Média	0,248	0,637
Desvio Padrão	0,020	0,008

4.2 ENSAIO DE MICRODUREZA

Na Figura 7, podemos observar os resultados do ensaio de microdureza que evidenciaram uma grande diferença entre os dois materiais das amostras. A região do substrato em aço SAE 1045 atingiu a microdureza média de 226,2 HV, enquanto a dureza do material duro depositado via MADA atingiu a microdureza média de 1.032,9 HV, sendo 457% mais duro que o substrato base. Desvio padrão de 38,3 HV e 71,0 HV, respectivamente.

Já na Figura 7 é possível verificar a representação das micrografias do metal base aço SAE 1045 ampliado 500x, onde é possível identificar sua microestrutura nas partes claras, correspondendo a ferrita e as escuras que correspondem a perlita. A perlita é mais dura e resistente que a ferrita, porém mais dúctil que a cementite.

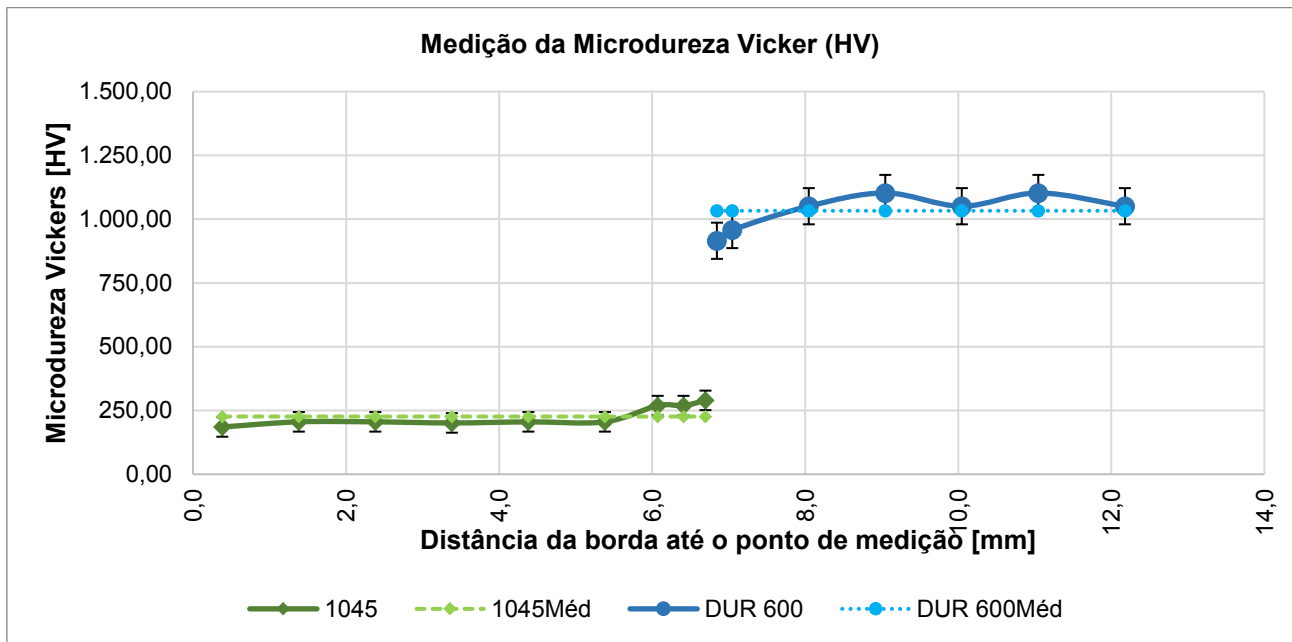


Figura 6: Ensaio de microdureza dos materiais [Autor, 2023].

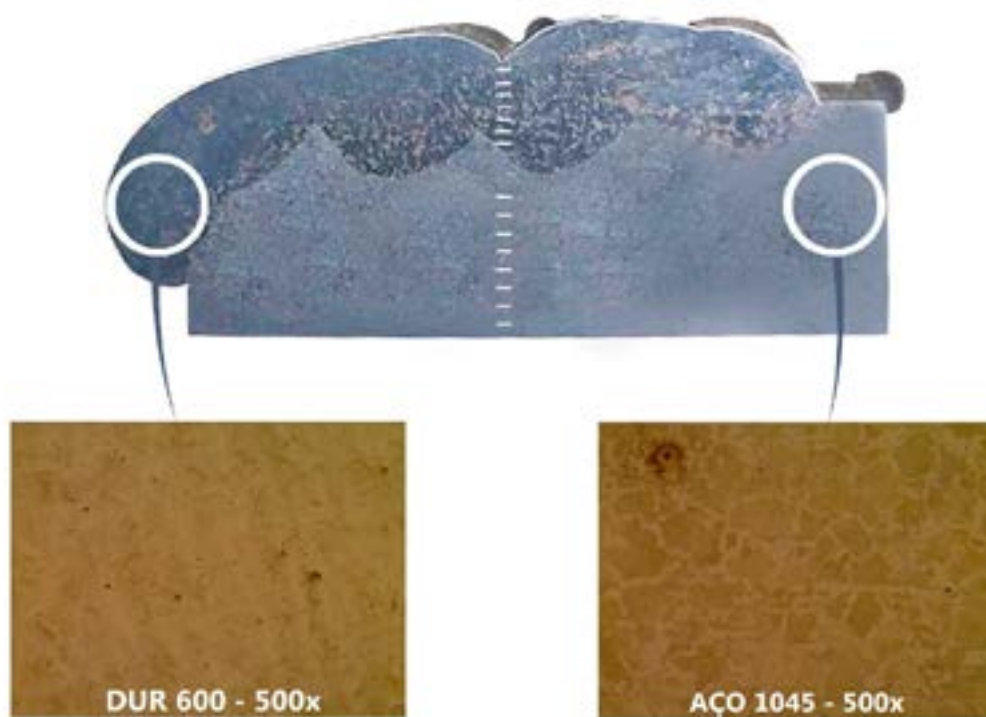


Figura 7: Ensaio de micrografia dos materiais [Autor, 2023].

4.3 ENSAIO DE DESGASTE RODA DE BORRACHA EM AREIA SECA NORMA ASTM G65

De acordo com a norma ASTM G65, os dados obtidos de perda de massa nos ensaios de desgaste em abrasômetro foram convertidos em perda de volume conforme equação 1. A Figura 8 apresenta os resultados de perda de volume do grupo de amostras com a deposição nos sentidos longitudinal e transversal.

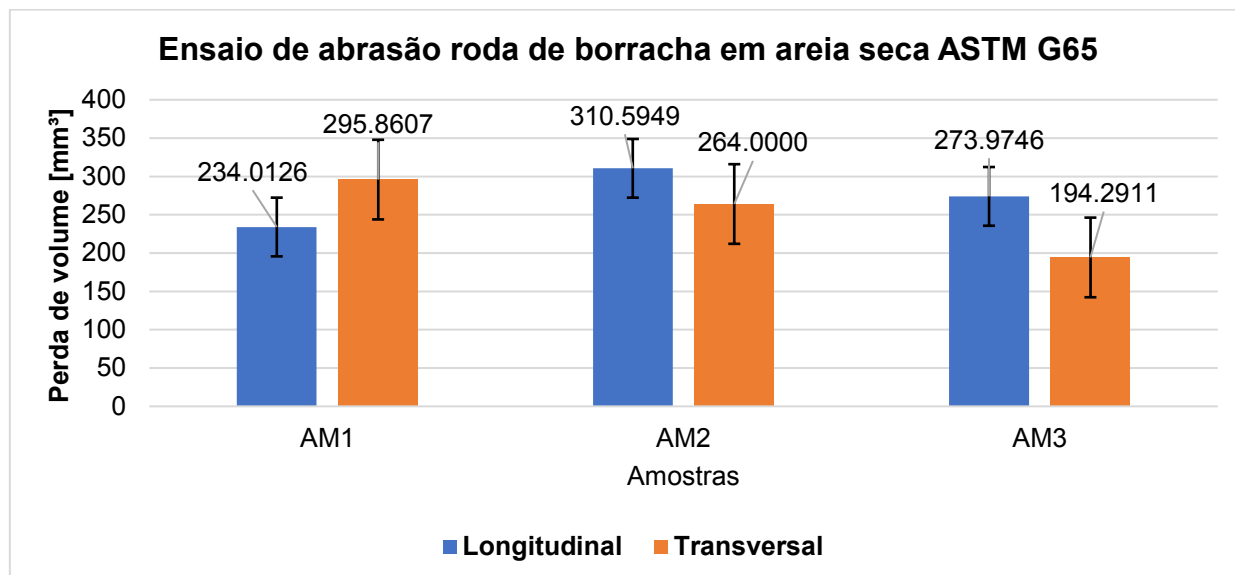


Figura 8: Gráfico de perda de volume em mm³ [Autor, 2023].

Conforme os resultados apresentados no gráfico, é possível observar que as amostras do grupo com deposição longitudinal obtiveram valores médios de perda de volume em 272,8607 mm³, cerca de 7,87% maior que a perda de volume identificada nas amostras com deposição transversal, que apresentaram 251,3839 mm³ de valor médio. Todavia, para o conjunto de amostras de ambos os tipos de corpos de prova, o desvio padrão dos valores médios foi de 38,3033 mm³ e 51,9468 mm³, respectivamente.

A perda de volume está associada ao plano de deposição do metal duro, no caso do grupo com deposição transversal, o revestimento duro depositado por manufatura aditiva sobre a base dos corpos de prova quando fixados no equipamento de abrasômetro, se comportaram perpendicular ao plano de rotação da roda de borracha durante todo o período de execução do ensaio, tendo como resultado maior resistência a abrasão. Em contrapartida, os corpos de prova com deposição longitudinal quando fixados no equipamento de abrasômetro, se comportaram paralelamente ao plano de rotação da roda de borracha o que favoreceu em maior perda de volume em mm³ após execução do proposto ensaio.

5. CONCLUSÃO

Conclui-se que a técnica de Manufatura Aditiva por Deposição a Arco (MADA) é um processo de deposição rápido e eficiente se caracteriza por ter uma boa união e uniformidade entre os cordões depositados, também se observou que a microdureza Vickers se permaneceu constante em cada região analisada.

Com o ensaio em roda da borracha em areia seca conforme a norma ASTM G65, verificou-se a eficiência da trajetória de deposição do material duro DUR600 via processo MADA, as amostras do grupo com deposição longitudinal obtiveram 7,87% maior perda de volume que as amostras com a deposição transversal.

A alteração na trajetória de deposição é uma grande ferramenta que pode ser aplicado no processo de recuperação das lastrinas para se obter maior resistência ao desgaste abrasivo, beneficiando a indústria cerâmica.

O controle dos parâmetros operacionais é de extrema importância para se obter deposições uniformes e homogêneas, portanto, o método MADA é uma técnica que está sendo cada vez mais difundida no âmbito laboratorial e no processo fabril das empresas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Universitário – UNISATC pelo apoio a pesquisa através do uso de sua estrutura de laboratórios e a Fundação de Amparo a Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina – FAPESC pelo apoio financeiro na compra de equipamentos e insumos para pesquisa.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BIFFI, G. O Grês porcelanto. **manual de fabricação e técnicas de emprego**, 2002. 262.
2. METALS, V. <https://www.villaresmetals.com.br/villares/pt/Produtos/Acos-Ferramenta/Trabalho-a-frio/VC131>. **villaresmetals**, 12 Setembro 2023. ISSN 1. Disponível em: <www.villaresmetals.com.br/villares/pt/Produtos/Acos-Ferramenta/Trabalho-a-frio/VC131>. Acesso em: 12 Setembro 2023.
3. 52900-15, I. **Standard terminology for additive manufacturing technologies - general principles - terminology**. **ASTM International, West Conshohocken**. [S.l.]. 2015.
4. LEI, Y. et al. Integration of a multi-directional wire arc additive manufacturing system with an automated process planning algorithm. **Journal of Industrial Information Integration**, China , 26, Março 2022. 100265.
5. WILLIAM , E. F. Metal Additive Manufacturing: A Review. **Journal of Materials Engineering and Performance**, 08 Abril 2014. 1917–1928.
6. SUMAN , D.; DAVID , L. B.; S. , S. B. Metallic materials for 3D printing. **MRS Bulletin** , 10 Outubro 2016. 729–741.
7. MALCOLM , D. et al. Effect of wire and arc additive manufacturing (WAAM) process parameters on bead geometry and microstructure. **Full Length Article**, 26, março 2019. 138-146.
8. BINTAO, W. et al. Effects of heat accumulation on microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloy deposited by wire arc additive manufacturing. **Full Length Article**, Outubro 2018. 151-160.
9. ABID, S. et al. A Review of the Recent Developments and Challenges in Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process. **J. Manuf. Mater**, 14 Maio 2023. 7, 97.
10. USIMINAS, U. S. D. M. G. S. A. **Usina José Bonifácio de Andrade e Silva**. Belo Horizonte / MG. 2021.
11. VOESTALPINE, B. E. A. F. P. T. A. F. **Voestalpine**, 2023. Disponível em: <www.villaresmetals.com.br/villares/pt/Produtos/Acos-Ferramenta/Trabalho-a-frio/VC131>. Acesso em: 19 Julho 2023.
12. 50320, D. **DIN 50320 Verschleiß - Begriffe, Analyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes**. **Beuth Verlag**. Berlin. 1979.
13. STOETERAU, R. L. E. A. Tribologia - Apostila de Graduação. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Departamento de Engenharia Mecânica., Florianópolis, p. 110-180, 2004.
14. G65-16, A. **Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus**. West Conshohocken. Pennsylvania. 2016.
15. SOUZA, D. L. D. L.; SALVADOR, J. L. Análise de esforços em um sistema de movimentação de um carro alimentador para prensa de compactação em uma indústria cerâmica. **Cerâmica Industrial**, Criciúma/SC, 22 Fevereiro 2017.
16. FERNANDES, T. D. S. et al. Análise de desgaste nas lastrinas da caixa matriz na indústria de revestimento cerâmicos. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba/PR, Novembro 2020. 85756-85774.
17. BRISTOT, V. M. Máquinas e equipamentos para cerâmica, Criciúma, 1996.
18. MOLDES, I. M. E. <https://www.iconmatrizesemoldes.com.br/produtos-detalhes/conjunto-completo-5>. Acesso em: 28 setembro 2023.



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil
26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

PREPARATION OF HYBRIDS OF WOOD SAWDUST WITH 3-AMINOPROPYLTRIETHOXYSILANE. APPLICATION AS AN ADSORBENT TO REMOVE REACTIVE BLUE 4 DYE FROM WASTEWATER EFFLUENTS

Beatris Lisbôa Mello ⁽¹⁾

Éder Cláudio Lima ⁽¹⁾

Pascal Silas Thue ⁽²⁾

Roberta Arlêu Teixeira ⁽¹⁾

Pâmela Vianini da Silva ⁽¹⁾

Paula da Cruz ⁽¹⁾

Amanda Elisa Giovanaz ⁽¹⁾

Julio César Pacheco Vaghetti ⁽¹⁾

Fernando Marchioro Kasperiski ⁽³⁾

Flávio André Pavan ⁽⁴⁾

ABSTRACT

Five biomass-based hybrid materials were synthesized from the reaction of 3-aminopropyltriethoxysilane (APTES) with Ayous wood sawdust (AW). Subsequently, these materials were characterized by hydrophobic/hydrophilic balance, CHN elemental analysis, surface area, TGA, FTIR and pH_{zpc}. The five materials were tested as adsorbents for removing the reactive dye blue 4 (RB-4) from water. The results demonstrated that the maximum removal was achieved with the material named AW@APTES-0.5. The kinetics and equilibrium data were suitably fitted by the nonlinear General-order kinetic and Liu equilibrium adsorption models.

⁽¹⁾ Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil

⁽²⁾ Federal University of Pelotas, Brazil

⁽³⁾ Federal University of Health Sciences of Porto Alegre, Brazil

⁽⁴⁾ Federal University of Pampa, Bagé campus, Brazil

The maximum amount of RB-4 dye adsorbed was 415.1 mg·g⁻¹ using the AW@APTES-0.5 material at a temperature of 50 °C. The applicability of the adsorbents in the treatment of effluents with simulated dyes showed excellent efficiency, reaching 98.66% of effluent removal.

Keywords: textile effluents, biomass-based hybrid materials, thermodynamics adsorption, adsorption mechanism, nonlinear fitting.

1. INTRODUCTION

There is a growing demand for dyes for use by industrial sectors such as textiles, paints and coatings, plastics and civil construction [1]. In addition to the production of dyes and pigments, several industries are also responsible for considerable amounts of dyes released into the environment [1], with the textile industry being the main industrial sector that consumes about two thirds of all dyes sold in the world [1]. There is a concern on the part of manufacturers of dyes and pigments with the toxicity of these compounds and, for this reason, efforts are being made to improve methods for removing dyes released into the environment during the manufacturing process [1-3].

Considering all dyes and pigments sold in 2019 [1], Reactive Dyes has a 55.7% share [1]. This class of dyes comprises highly colored organic compounds that have primary application in textile coloring [1]. Reactive dyes can form a covalent bond with the cotton fiber [1,4], giving them the characteristic of presenting difficulty in fading and bands of bright shades [1,4]. Although reactive dyes are mainly used to dye fabrics, 1550% of them are left hydrolyzed in water baths during the dyeing process [5]. Therefore, large volumes of wastewater containing reactive dyes are generated and require additional treatment before being discharged into water bodies [2,3,6-8].

The removal of dyes from the aqueous environment is imperative because they are toxic and can cause carcinogenicity and mutagenicity [9-12]. Wastewater containing dyes are usually treated by biodegradation [13,14], coagulation-flocculation [14], the advanced oxidative process [15], and adsorption [16-20]. The most employed method for treating wastewater containing dyes is the adsorption procedure [21,22] because of its low initial value for implementation, easy operation, a decrease in the dye's availability after the adsorption, remarkable decrease in the volume of effluent after treatment, and the possibility of the regeneration of the adsorbent after use [23,24].

Lignocellulosic wastes have been reported as adsorbents for removing dyes from wastewaters [3,26]. Although their spread is used as biosorbents, the adsorption capacities of agricultural residues are low compared with other adsorbents [6,7,23,24] because of their low surface area and the difficulty of being used in the column due to low mechanical resistance [6,7,23,24]. The chemical modification of biomass-forming hybrids and composites is a good alternative for producing adsorbents with higher adsorption capacities over unmodified lignocellulosic materials [6,7,23,24].

The 3-aminopropyl-triethoxysilane (APTES) is an organic-silane compound used for coupling with oxygen atoms present on silica, alumina, zirconia, TiO₂, and others, forming a terminal aminate group on the surface of the inorganic material [23-32]. Although it is well known that the chemical modification of inorganic materials with APTES [23-31], recently, has been reported the formation of hybrids/ composite materials with biomass-based materials [7,23,24,30-35]. In this context, it is vital to produce new APTES hybrid materials with plant biomass and compare its increment in performance for removing Reactive Dyes from aqueous effluents concerning unmodified biomass.

In the present research, we proposed the chemical modification of sawdust of Ayous wood with APTES. Preliminary experiments showed that AW@APTES-0.5 is the best adsorbent for the removal of RB-4 dye from aqueous effluents. This work aimed to show that AW@APTES-0.5 material increased the maximum sorption capacity of AW biomass up to 21.6 times. This remarkable characteristic allows that the proposed adsorbent would be able to be used in actual wastewater treatments. Besides that, the procedure for preparing the hybrid material was carried out in a single step, being an advantage when compared with adsorbents that require multiple steps for being obtained [36,37].

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Reactants and solutions

Deionized water was used to prepare the solutions. The Reactive Blue 4 dye (RB-4; C.I. 61,205) (see Fig. S1) was Merck's furnished at 95% purity. Merck furnished ethanol, 3-aminopropyltriethoxysilane (APTES, 98%), and ammonium hydroxide (2830% weight). The medium's acidity was adjusted using $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ of HCl and NaOH (Neon).

2.2. Hybrid of Ayous@APTES

Hybrid adsorbents of Ayous sawdust (AW) and APTES were synthesized using NH_4OH as a catalyst for the hydrolysis and polycondensation of APTES [7,23]. Typically, 10 grams of AW was slurried in 100 mL of ethanol, and subsequently, it was added 250 mL of NH_4OH and 2.5 grams of APTES. The reactional mixture was magnetically agitated at $80 \text{ }^\circ\text{C}$ for 24 hours, which allows the formation of AW@APTES hybrids using a single step [7,23] (Figure 1). Furtherly, the hybrid material was dried overnight at $75 \text{ }^\circ\text{C}$ in a conventional furnace. The obtained hybrid was named AW@APTES-0.25. Similarly, the AW@APTES-0.50, AW@APTES-1.0, AW@APTES-1.5, and AW@APTES-2.0 were synthesized, using 10 grams of AW and 5, 10, 15, and 20 grams of APTES, respectively.

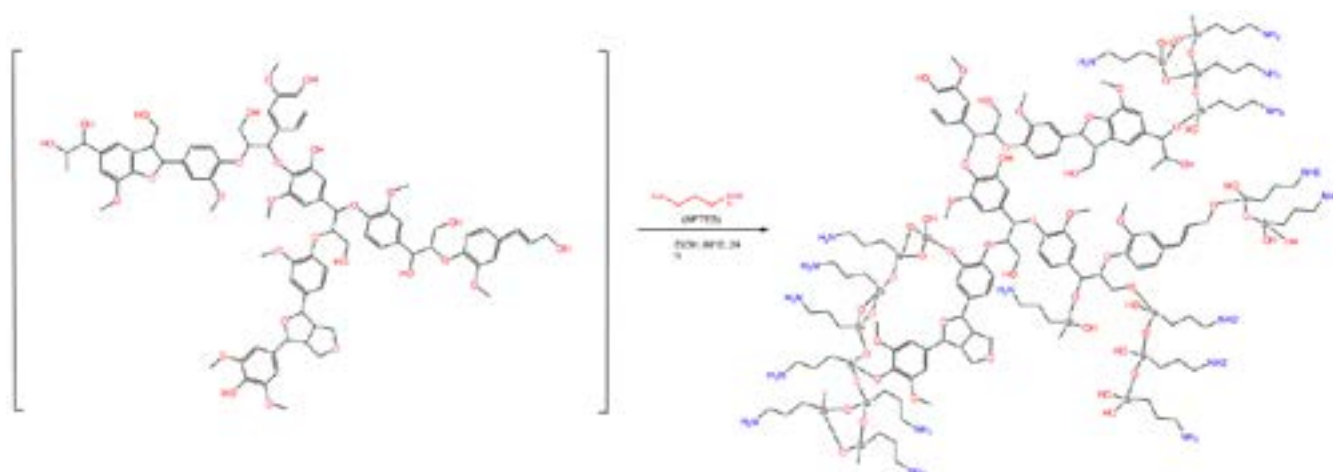


Figure 1: Scheme of formation of hybrid.

2.3. Characterization of the hybrid materials

Isotherms of adsorption and desorption of nitrogen were performed to study samples' textural characteristics using a volumetric analyzer furnished by Micromeritics Instrument (TriStar II 3020). The determination of surface area was calculated using the BET multipoint method [38], and the pore diameter was attained using the BJH method [39] and DFT Method [40].

Elemental analysis (C H N/O) was carried out utilizing an Agilent elemental analyzer [41].

The functional groups present on surfaces of the samples were studied using a Fourier Transform Infra-Red (FTIR) spectrometer (Bruker, model alpha) in the range $4000\text{--}400 \text{ cm}^{-1}$ [42].

The pH_{pzc} and hydrophobicity index (HI) of the carbon materials were obtained as described elsewhere [43,44].

The thermal stability of the AW and AW@APTES-0.5 were made by TGA analysis (TA model SDT Q600) using a heating program of 20° to $800 \text{ }^\circ\text{C}$ ($10 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$) under a nitrogen stream, and from 800° to $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, under air gas [41,45].

2.4. Batch-contact adsorption experiments

An aliquot of 20.00 mL of RB-4 solution with the initial concentration varying from 10.0 to 1400.0 mg L⁻¹ was added to 50.0 mL flat-Falcon tubes with 30.0 mg of AW and AW@APTES-X (x = 0.25; 0.50; 1.0; 1.5; 2.0) at pH ranging 2.0 to 10.0. The Falcon tubes were capped and disposed of horizontally inside a thermostatic reciprocating agitator (Oxy 350, Sao Leopoldo, Brazil). The slurries ~ were shaken at different time intervals between 3 and 480 min at 10° to 50 °C with a shaking speed of 120 strikes by minutes [45,46]. Subsequently, the solid phase was separated from the liquid phase by centrifugation. When necessary, aliquots of 110 mL of the liquid phase were diluted to 1.025.0 mL in calibrated volumetric flasks using the blank solution. The dye's unadsorbed after the adsorption process was measured using the T90+ PG Instruments spectrophotometer at a maximum absorption wavelength of 594.0 nm. The sorption capacity (Eq (1)) and the percentage of RB-4 removed (Eq (2)) are given below:

$$q = \frac{(C_0 - C_f) \cdot V}{m} \quad (1)$$

$$\% \text{Removal} = 100 \cdot \frac{(C_0 - C_f)}{C_0} \quad (2)$$

q is the sorption capacity of RB-4 adsorbed by the adsorbent (mg·g⁻¹). Co is the initial RB-4 solution concentration in contact with the solid adsorbent (mg·L⁻¹). Cf is the final RB-4 concentration after adsorption (mg·L⁻¹). m is the mass of adsorbent (grams). V is the aliquot of the dye solution (liters) introduced in the flask.

The study of the influence of the initial pH of RB-4 was performed at 25 °C, using an initial concentration of 300 mg·L⁻¹ of dye solution, a time of contact between the adsorbent and adsorbates of 2 hours, an adsorbent dosage of 1.5 g·L⁻¹, and pH ranging from 2.0 to 10.0.

The preliminary experiments were carried out to ensure reproducibility, reliability, and accuracy of the experimental data. The relative standard deviations of all measurements were below 4% [47]. Blanks were run in parallel and corrected when necessary [48]. The solutions of RB-4 were stored in glass bottles, which were cleaned, rinsing with deionized water, drying, and storing them in a suitable cabinet [49].

Standard RB-4 solutions (1.080.0 mg·L⁻¹) were used for calibration in parallel with a blank. The linear analytical calibration curve was performed on the UV-Win software of the T90+ PG Instruments spectrophotometer. The detection limits of RB-4 were 0.21 mg·L⁻¹, with a signal/noise ratio of 3 [50].

A 50.0 mg·L⁻¹ of standard RB-4 solutions was used as quality control after every ten measurements to ensure the analytes measurements' accuracy [48].

2.5. Adsorption kinetics and equilibrium models

The kinetic adsorption data were evaluated using three models: pseudo-first order, pseudo-second order, and general order kinetic models [51]. The equilibrium adsorption data were evaluated using isotherm models of Langmuir, Freundlich, and Liu [51].

2.6. Synthetic effluent

Two dye-house effluents containing five reactive dyes, one organic matter, one surfactant, and seven inorganic salts were made. These effluents' chemical composition is compatible with industrial-textile wastewater. The purpose of using simulated effluents is to test the adsorption capacities of the adsorbents for removal of the mixture of dyes in a medium that contains high concentrations of salts, surfactant, and organic matter.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Screening of different adsorbents for the uptake of RB-4 dye

The first screening of the six adsorbents (AW, AW@APTES-0.25, AW@APTES-0.50, AW@APTES-1.0, AW@APTES-1.5, AW@APTES-2.0) as adsorbents for removing RB-4 from the water was carried out. As observed, all hybrid materials AW@APTES-X (X = 0.25, 0.50, 1.0, 1.5, 2.0) presented a superior adsorption capacity than unmodified wood sawdust (AW). However, for APTES amounts higher than 0.5, the adsorbent's adsorption capacity had a slight decrease and a slight worsening of the measurements' reproducibility. This loss of sorption capacity could be assigned to the formation of oligomers of APTES that did not react with OH groups present on the lignin, cellulose, and hemicellulose groups of the AW biomass [52].

The experiments were performed initially in pH 2.0 because, in earlier works where APTES grafted on different materials [7,16,26], the amino group is protonated, forming an ammonium group positively charged that attracts the anionic RB-4 dye [7,16,26]. This behavior is one of the achievements of using APTES grafted materials for adsorbing dyes [7,16,26] concerning unmodified AW sawdust. For continuing this work, the AW@APTES-0.5 will be material that will be wholly characterized as adsorbent because it presents a good cost/benefit relationship.

3.2. pH_{pzc} and effect of initial pH on the adsorption capacity

The pH_{pzc} of AW@APTES-0.5 and AW are presented in Figure 2. The chemical modification of AW with APTES shifts the pH_{pzc} from 6.051 to 10.37. Making a simulation of values of pKa of the proposed AW@APTES-0.5 structure using the plugins of Marvin Sketch 21.1.0, pKa values of the amino group are ranging from 9.3 to 11.7; and 7.00 to 11.7 for terminal silanol groups. The estimated isoelectric point of the structure was 9.86. Based on pKa and isoelectric point values, it is reasonable that the experimental pH_{pzc} of AW@APTES-0.5 be 10.37.

Another important point that should be highlighted is the differences in values of pH_{pzc} for AW@APTES-0.5 and AW. The grafting of AW with APTES increases the adsorbent's basicity considerably by introducing amino groups (around 10% concerning nitrogen elemental analysis and TGA results) on the surface. This increment of nitrogen basic groups on AW@APTES-0.5 is responsible for increasing this hybrid adsorbent's sorption capacity compared to unmodified AW biomass.

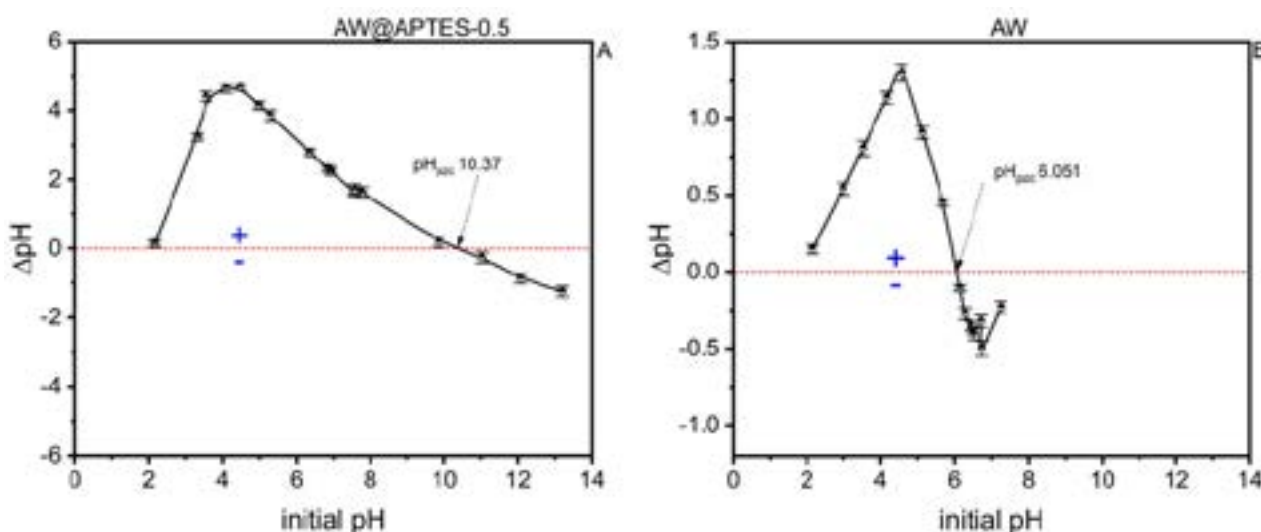


Figure 2: pH_{pzc} A - AW@APTES-0.5, and B – AW.

3.3. Determination of the amount of 3-aminopropylsilane in AW@APTES-0.5

According to the nitrogen contents, from the CHN analysis, the AW did not present nitrogen, and the AW@APTES-0.5 presented 1%. Therefore, it means that every 100 grams of the hybrid sample would contain 1.00 grams of nitrogen that was introduced through APTES grafting on lignin (see Figure 3). After performing a stoichiometric calculation for each mole of nitrogen, it would contain one mole of $-O_3SiC_3H_8N$ bound to the hybrid material.

Also, the TGA analysis can furnish valuable information about the grafting of APTES on AW sawdust [41,44,45]. The thermal profiles of AW@APTES-0.5 and AW are presented in Figure 3. The thermal profiles of AW and AW@APTES-0.5 were obtained using two different atmospheres. From room temperature up to 800 °C it was used inert atmosphere (N_2 stream) and from 800° to 1000 °C synthetic air was used [41,45]. This choice is made to verify the thermal stability of AW and AW@APTES-0.5 under an inert atmosphere at relatively high temperatures (800 °C). Moreover, in the same run, an oxidizing atmosphere will degrade all the organic compounds generating ashes [7,41,45]. In this case, for the hybrid material, the difference of AW@APTES-0.5 residual mass minus the AW residual mass is the amount of SiO_2 left in the hybrid material.

Furthermore, from this result, it is possible to estimate the number of APTES groups attached to the hybrid material. Making this calculation, the net SiO_2 percentage in the hybrid material was 4.81%. Making a stoichiometric calculation of one mol of SiO_2 for one mol of $-O_3SiC_3H_8N$ attached to sawdust, the percentage of APTES grafted on hybrid material was 10.73%, whose values is not so distant from the value obtained by nitrogen elemental analysis described above (9.57%).

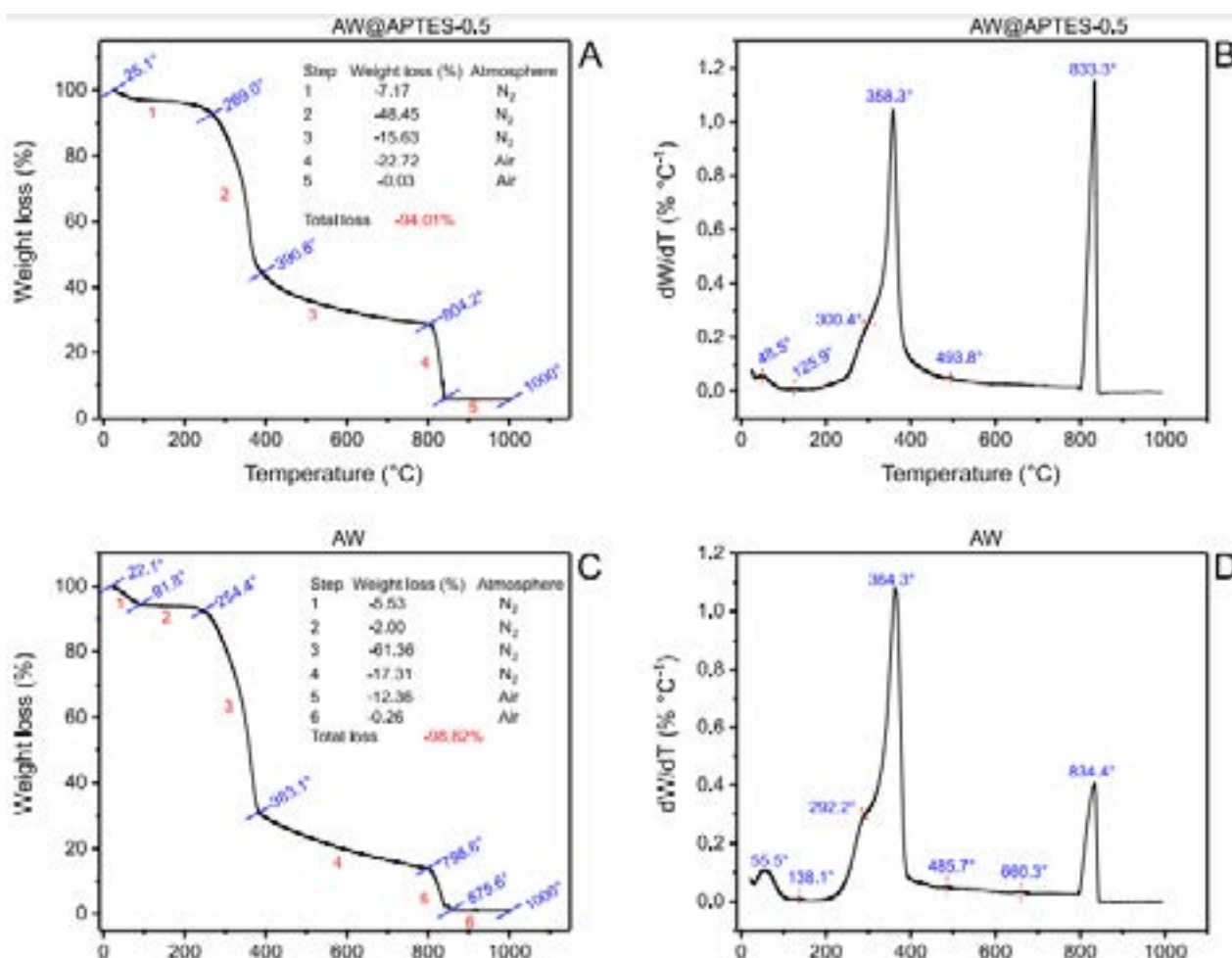


Figure 3: TGA and DTA analysis. A - TGA of AW@APTES-0.5; B - DTA of AW@APTES-0.5; C - TGA of AW; D - DTA of AW.

3.4. Kinetics of adsorption

Kinetic data of adsorption of RB-4 dye on AW@APTES and AW adsorbent materials were performed using pseudo-first order (PFO), pseudo-second order (PSO) and general order (GO) [53], and the experimental data can be found in Figure 4.

Observing the graphs in Figure 4, it is understandable that the kinetic data did not adequately follow the PFO. Kinetic data seem to follow PSO and GO. Values of R² adj, SD and mainly BIC values [44-46, 53] help to define the best model to explain the kinetic model. The GO kinetic model showed the lowest SD values, lowest BIC values and values closest to 1.00 of R² adj. It can be stated that the kinetic data of the adsorption of the RB-4 dye in AW and AW@APTES-0.5 were more adequately fitted using the GO kinetic model [53].

As earlier reported [7,8,27,30,41,42,44-46], the constant rate k is not suitable for comparing different kinetic models because it presents different units, depending on the model. However, an interpolation in the nonlinear fitted curve for 50% of the saturations and 95% saturation will lead to $t_{1/2}$ and $t_{0.95}$, respectively. Disregarding the values of $t_{1/2}$ and $t_{0.95}$ for PFO, the values of $t_{1/2}$ are about 10 and 12 minutes for AW@APTES-0.5 and AW, respectively. The time 0.95 is a good estimative to know the time for obtaining the isotherm results [7,8,27,30,41,42,44-46]. Considering the $t_{0.95}$ for GO kinetic model, these times were about 165 (AW@APTES-0.5) and 198 min (AW). Considering that higher concentrations of RB-4 could delay a little bit more, the time for performing the isotherms of adsorption was established at 240 minutes (4 hours) to guarantee that the system attained the adsorption equilibrium utilizing both adsorbents.

Besides the values of time 1/2 and time 0.95 help establish the time for performing the isotherms, these values indicated that the kinetics of adsorption of RB-4 onto AW@APTES-0.5 is slightly faster than AW because these differences are not remarkable. The differences in the superficial area, pore size distribution, and total pore volume are also not remarkable, but the hybrid material presents slightly better values for these textural characteristics.

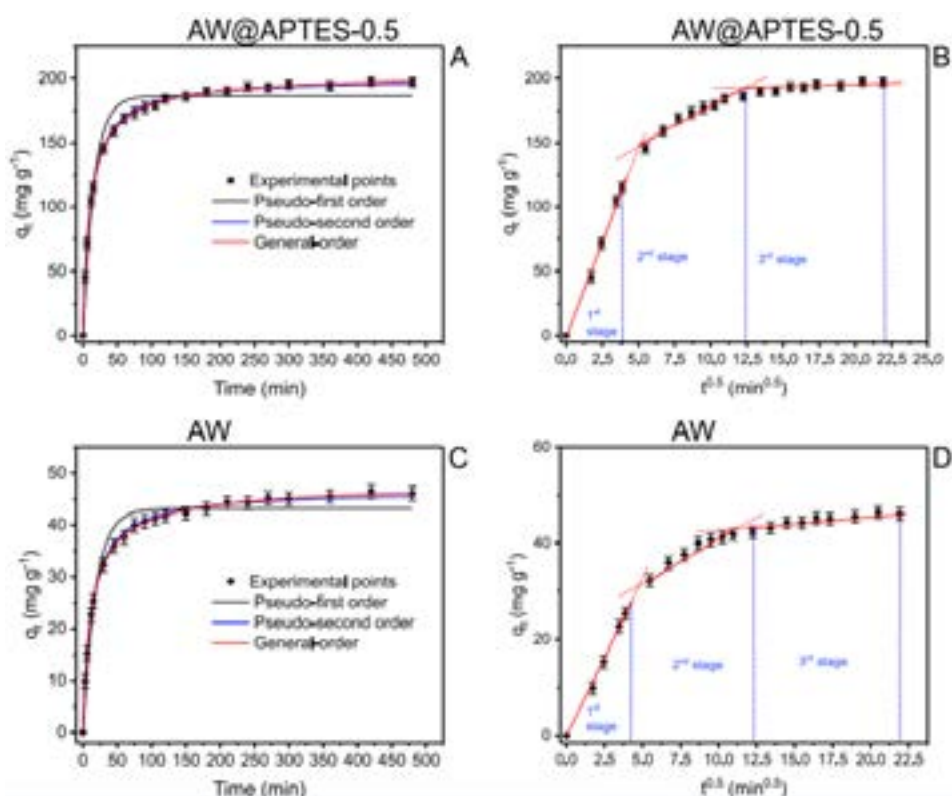


Figure 4: Kinetics of adsorption of $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ RB-4 onto AW@APTES-0.5 and AW adsorbents. A - nonlinear fitting using AW@APTES-0.5 adsorbent; B - intraparticle diffusion of RB-4 onto AW@APTES-0.5 adsorbent; C - nonlinear fitting using AW adsorbent; D - intraparticle diffusion of RB-4 onto AW adsorbent.

3.5. Isotherms and interaction of adsorbent with the adsorbate

Adsorption and desorption isotherms of RB-4 dye on AW@APTES-0.5 and AW at temperatures ranging from 10° to 50°C were carried out. According to the results obtained, the Liu isotherm model was better fitted by the isotherm data at temperatures ranging from 10° to 50°C, due to the lower SD and BIC and R^2_{adj} closer to 1 were obtained for this model. isothermal. The ΔBIC between Langmuir and Liu ranged from 50.23 to 55.63 for temperatures of 10° – 40°C and 3.390 to 50°C, using the hybrid adsorbent, and 52.85 to 104.3 for 10° to 50°C using AW biomass [53]. For all ΔBIC 10 it is conclusive that the Liu model was the best fit model. The $BIC_{Freudlich} - BIC_{Liu}$ ranged from 62.19 to 123.5 (AW@APTES-0.5) and 90.06 – 124.7 (AW) for temperatures from 10° to 50°C. Therefore, considering the adsorption of RB-4 on both adsorbents, the equilibrium data were successfully fitted by the Liu model in the temperature range of 10° to 50°C.

Considering the Q_{max} values obtained by the Liu isotherm for both adsorbents, it is observed that AW@APTES-0.5 presented values 8,8 – 21.6 times greater than AW. This considerable increase in the adsorption capacity is due to the possible formation of AW@APTES0.5 represented in Figure 1. The insertion of amino groups in the hybrid material leads to positively charged ammonium groups when the adsorbent is immersed in a solution with pH 2.0, facts that allow electrostatically attracting the anionic dye RB-4.

3.6. Simulated effluents

Two synthetic effluents were prepared to verify the performance of AW@APTES-0.5 and AW as adsorbents for the treatment of effluents from textile effluents. An adsorbent with potential application in real situations must present good removal in medium containing several compounds [2,3,6,7,8,16,26,27]. Figure 5 shows the UVVIS spectrum of simulated effluents A and B before adsorption (black spectrum) and after treatment with AW@APTES-0.5 (red spectrum) and AW (blue spectrum).

For calculating the overall removal percentage, it was integrated the area under the curves [41]. Considering that absorbance is an additive property [41], the absorbance of each component present in the effluents is summed during integration [41]. The removal percentage can be calculated by the spectrum area after treatment divided by the effluent area before treatment [41]. For effluent A, the overall removals obtained were 98.66% (AW@APTES0.5) and 10.24% (AW) (see Figure 5). For effluent B, which has higher concentrations of components, the overall removals obtained were 98.52% (AW@APTES-0.5) and 9.15% (AW). These results demonstrate that AW@APTES-0.5 has a maximum adsorption capacity of 276.8 mg g⁻¹ at 25 °C and, consequently, can be used as an adsorbent in the treatment of textile effluents containing dyes.

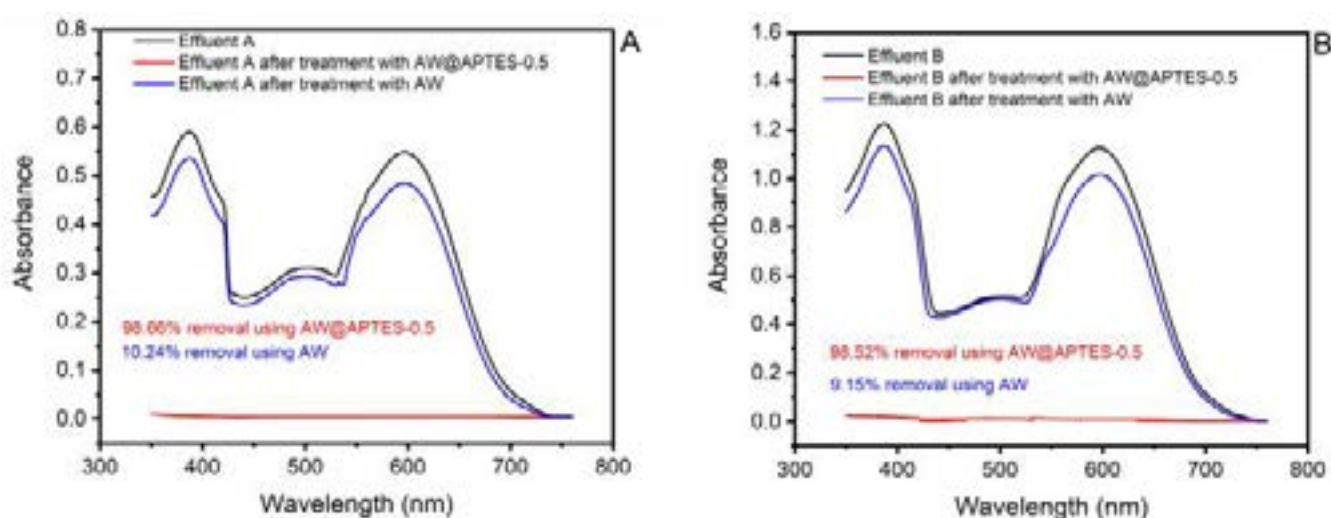


Figure 5: UVVis spectra before and after treatment with both adsorbents. A- Effluent A; B- Effluent-B.

4. CONCLUSION

In the first screening of the adsorbents produced to remove the Reactive Blue 4 (RB-4) dye, it was demonstrated that the AW@APTES-0.50 material is the best hybrid material to continue the work due to its greater sorption capacity and lower variability of the results. To compare the performance differences of AW@APTES-0.5, unmodified biomass (AW) was used. The adsorption kinetics data better fit the non-linear general order (GO) kinetic model, and the equilibrium data obtained at temperatures ranging from 10° to 50 °C showed that the non-linear model of the Liu isotherm better represented the adsorption equilibrium. Adsorption thermodynamics showed that the adsorption process was favorable (ΔG^0), and the magnitude of enthalpy variations is compatible with physical adsorption. Based on all the results obtained in this work, an adsorption mechanism must occur where the main contribution is the electrostatic attraction of the anionic dye with the positively charged adsorbent at pH 2.0. The results of the simulated effluent treatment showed that AW@APTES-0.50 is a potential adsorbent to be used in real applications, as the removal efficiency reached up to 98.66% of a sample with complex formulation.

REFERENCES

- [1] Global Dyes and Pigments Market Size Report, 2020-2027. Grand View Research; Website visited on February 12th, 2021. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/dyes-and-pigments-market>.
- [2] Puchana-Rosero MJ, Adebayo MA, Lima EC, Machado FM, Thue PS, Vaghetti JCP, Umpierres CS, Gutterres M. Microwave-assisted activated carbon obtained from the sludge of tannery-treatment effluent plant for removal of leather dyes. *Colloids Surfa A: Physicochem Eng Aspects* 2016;504:105–15.
- [3] Alencar WS, Lima EC, Royer B, dos Santos BD, Calvete T, da Silva EA, Alves CN. Application of aqai stalks as biosorbents for the removal of the dye Procion Blue MX-R from aqueous solution. *Sep Sci Technol* 2012;47:513–26.
- [4] Matyjas E, Rybicki E. Novel reactive red dyes. *Autex Res J* 2003;3:90–5.
- [5] Hessel C, Allegre C, Maisseu M, Charbit F, Moulin P. Guidelines and legislation for dye house effluents. *J Environ Manag* 2007;83:171–80.
- [6] Adebayo MA, Prola LDT, Lima EC, Puchana-Rosero MJ, Cataluna R, Saucier C, ~ Umpierres CS, Vaghetti JCP, da Silva LG, Ruggiero R. Adsorption of Procion Blue MX-R dye from aqueous solutions by lignin chemically modified with aluminum and manganese. *J Hazard Mater* 2014;268:43–50.
- [7] Leite AJB, Lima EC, dos Reis GS, Thue PS, Saucier C, Rodembusch FS, Dias SLP, Umpierres CS, Dotto GL. Hybrid adsorbents of tannin and APTES (3-aminopropyltriethoxysilane) and their application for the highly efficient removal of acid red 1 dye from aqueous solutions. *J Environ Chem Eng* 2017;5:4307–18.
- [8] Machado FM, Sophia AC, Lima EC, Dias SLP, Prola LDT, Saucier C, Jauris IM, Zanella I, Fagan SB. Adsorption of Alizarin Red S Dye by Carbon Nanotubes- An Experimental and Theoretical Investigation. *J Phys Chem C* 2016;120:18296–306.
- [9] de Lima ROA, Bazo AP, Salvadori DMF, Rech CM, Oliveira DP, Umbuzeiro GA. Mutagenic and carcinogenic potential of a textile azo dye processing plant effluent that impacts a drinking water source. *Mutat Res Genet Toxicol Environ Mutagen* 2007;626:53–60.
- [10] Kaledin VI, Il'nitskaya SI, Ovchinnikova LP, Popova NA, Bogdanova LA, Morozkova TS. Mutagenic Activation and Carcinogenicity of Aminoazo Dyes ortho Aminoazotoluene and 3' Methyl-4- Dimethyl-amino-azobenzene in Experiments on Suckling Mice. *Biophysics (Oxf)* 2014;59:431–5.
- [11] Alderete BL, da Silva J, Godoi R, da Silva FR, Taffarel SR, da Silva LP, Garcia ALH, Mitteregger-Jr. H, de Amorim HLN, Picada JN. Evaluation of toxicity and mutagenicity of a synthetic effluent containing azo dye after advanced oxidation process treatment. *Chemosphere* 2021;263:128291. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128291.
- [12] Kokturk M, Altindag F, Ozhan G, € Calimli MH, Nas MS. Textile dyes Maxilon blue , 5G and Reactive blue 203 induce acute toxicity and DNA damage during embryonic development of Danio rerio. *Comparat Biochem Physiol, Part C* 2021;242:108947. doi: 10.1016/j.cbpc.2020.108947.
- [13] Goud BS, Cha HL, Koyyada G, Kim JH. Augmented biodegradation of textile azo dye effluents by plant endophytes: a sustainable, eco-friendly alternative. *Curr Microbiol* 2020;77:3240–55.
- [14] Ayed L, El-Ksibi I, Charef A, El-Mzoughi R. Hybrid coagulation-flocculation and anaerobic-aerobic biological treatment for industrial textile wastewater: a pilot case study. *J Text Inst* 2021;112:200–6.
- [15] Santana RMR, Charamba LCV, do Nascimento GE, de Oliveira JGC, Sales DCS, Duarte MMB, Napole~ ao DC. Degradation of textile dyes employing advanced oxidative processes: kinetic, equilibrium modeling, and toxicity study of seeds and bacteria. *Water Air Soil Pollut* 2019;230:136. doi: 10.1007/s11270-019- 4178-x.

- [16] de Menezes EW, Lima EC, Royer B, de Souza FE, dos Santos BD, Gregorio JR, Costa TMH, Gushikem Y, Benvenuti EV. Ionic silica-based hybrid material containing the pyridinium group used as an adsorbent for textile dye. *J Colloid Interface Sci* 2012;378:10–20.
- [17] Wu J, Liu J, Wen B, Li Y, Zhou b, Wang Z, Yang S, Zhao R. Nitrogen-rich covalent triazine frameworks for high-efficient removal of anion dyes and the synergistic adsorption of cationic dyes. *Chemosphere* 2021;272:129622. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.129622.
- [18] Ji Y, Zhang W, Yang H, Ma F, Xu F. Green synthesis of poly(pyrrole methane) for enhanced adsorption of anionic and cationic dyes from aqueous solution. *J. Colloid Interface Sci* 2021;590:396–406.
- [19] Reghioia A, Barkat D, Jawad AH, Abdulhameed AS, Khan MR. Synthesis of Schiff's base magnetic crosslinked chitosan-glyoxal/ZnO/Fe₃O₄ nanoparticles for enhanced adsorption of organic dye: modeling and mechanism study. *Sustain Chem Pharm* 2021;20:100379. doi: 10.1016/j.scp.2021.100379.
- [20] Didehban A, Zabihi M, Faghihi M, Akbarbandari F, Akhtarivand H. Design and fabrication of core-shell magnetic and non-magnetic supported carbonaceous metal-organic framework nanocomposites for adsorption of dye. *J Phys Chem Solids* 2021;152:109930. doi: 10.1016/j.jpcs.2020.109930.
- [21] dos Santos JMN, Pereira CR, Pinto LAA, Frantz T, Lima EC, Foletto EL, Dotto GL. Synthesis of a novel CoFe₂O₄/chitosan magnetic composite for fast adsorption of indigotine blue dye. *Carbohydr Polym* 2019;217:6–14.
- [22] Abdel-Ghani NT, El-Chaghaby GA, Rawash ESA, Lima EC. Magnetic activated carbon nanocomposite from *Nigella sativa* L. waste (MNSA) for the removal of Coomassie brilliant blue dye from aqueous solution: statistical design of experiments for optimization of the adsorption conditions. *J Adv Res* 2019;17:55–63.
- [23] Carijo PM, dos Reis GS, Lima EC, Dotto GL. Functionalization of corn stover with 3aminopropyl-triethoxysilane to uptake Reactive Red 141 from aqueous solutions. *Environ Sci Pollut Res* 2019;26:32198–208.
- [24] Lima VVC, Nora FBD, Peres EC, Reis G, Lima EC, Oliveira MLS, Dotto GL. Synthesis and characterization of biopolymers functionalized with APTES (3 aminopropyltriethoxysilane) for the adsorption of sunset yellow dye. *J Environ Chem Eng* 2019;7:103410. doi: 10.1016/j.jece.2019.103410.
- [25] Franco DSP, Tanabe EH, Bertuol DA, dos Reis GS, Lima EC, Dotto GL. Alternative treatments to improve the potential of rice husk as an adsorbent for methylene blue. *Water Sci Technol* 2017;75:296–305.
- [26] Wamba AGN, Lima EC, Ndi SK, Thue PS, Kayem JG, Rodembusch FS, dos Reis GS, de Alencar WS. Synthesis of grafted natural pozzolan with 3-aminopropyltriethoxysilane: preparation, characterization, and application for removal of Brilliant Green 1 and Reactive Black 5 from aqueous solutions. *Environ Sci Pollut Res* 2017;24:21807–20.
- [27] Thue PS, Sophia AC, Lima EC, Wamba AGN, de Alencar WS, dos Reis GS, Rodembusch FS, Dias SLP. Synthesis and characterization of a novel organic-inorganic hybrid clay adsorbent for the removal of acid red 1 and acid green 25 from aqueous solutions. *J. Clean. Prod.* 2018;171:30–44.
- [28] Wamba AGN, Kofa GP, Koungou SN, Thue PS, Lima EC, dos Reis GS, Kayem JG. Grafting of Amine functional group on silicate-based material as an adsorbent for water purification: a short review. *J Environ Chem Engin* 2018;6:3192–203.
- [29] Wamba AGN, Ndi SK, Lima EC, Kayem JG, Thue PS, Costa TMH, Quevedo AB, Benvenuti EV, Machado FM. Preparation, characterization of titanate nanosheetpozzolan nanocomposite and its use as an adsorbent for removal of diclofenac from simulated hospital effluent. *J Taiwan Inst Chem Eng* 2019;102:321–9.
- [30] Caicedo DF, dos Reis GS, Lima EC, de Brum IAS, Thue PS, Cazacliu BG, Lima DR, dos Santos AH, Dotto GL. Efficient adsorbent based on construction and demolition wastes functionalized with 3-aminopropyltriethoxysilane (APTES) for the removal ciprofloxacin from hospital synthetic effluents. *J Environ Chem Eng* 2020;8:103875. doi: 10.1016/j.jece.2020.103875.
- [31] Dogar S, Nayab S, Farooq MQ, Said A, Kamran R, Duran H, Yameen B. Utilization of biomass fly ash for improving quality of organic dye-contaminated water. *ACS Omega* 2020;5:15850–64.
- [32] Nematidil N, Sadeghi M, Nezami S, Sadeghi H. Synthesis and characterization of Schiff-base-based chitosan-g-glutaraldehyde/NaMMTNP/APTES for removal Pb₂⁺ and Hg₂⁺ ions. *Carbohydr Polym* 2019;222:114971. doi: 10.1016/j.carbpol.2019.114971.
- [33] Laureano-Anzaldo CM, Haro-Mares NB, Meza-Contreras JC, Robledo-Ortíz JR, Manríquez-Gonzalez R. Chemical modification of cellulose with zwitterion moieties used in the uptake of red Congo dye from aqueous media. *Cellulose* 2019;26:9207–27.
- [34] An L, Si C, Bae JH, Jeong H, Kim YS. One-step silanization and amination of lignin and its adsorption of Congo red and Cu(II) ions in an aqueous solution. *Int J Biol Macromol* 2020;159:222–30.
- [35] Fotsing PN, Bouazizi N, Woumfo ED, Mofaddel N, Derf FL, Vieillard J. Investigation of chromate and nitrate removal by adsorption at the surface of an amine-modified cocoa shell adsorbent. *J Environ Chem Eng* 2021;9:104618. doi: 10.1016/j.jece.2020.104618.
- [36] Bayat A, Tati A, Ahmadipouya S, Haddad SA, Arjmand M. Electrospun chitosan/ polyvinyl alcohol nanocomposite holding polyaniline/silica hybrid nanostructures: an efficient adsorbent of dye from aqueous solutions. *J Mol Liq* 2021;331:115734. doi: 10.1016/j.molliq.2021.115734.

- [37] Sirajudheen P, Karthikeyan P, Vigneshwaran S, Basheer MC, Meenakshi S. Complex interior and surface modified alginate reinforced reduced graphene oxide/hydroxyapatite hybrids: removal of toxic azo dyes from the aqueous solution. *Int J Biol Macromol* 2021;175:361–71.
- [38] Thommes M, Kaneko K, Neimark AV, Olivier JP, Rodriguez-Reinoso FJ, Rouquerol KS, Sing W. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure Appl Chem* 2015;87:1051–69.
- [39] Haghghatju F, Rafsanjani HH, Esmaeilzadeh F. Estimation of the dimension of micropores and mesopores in single-walled carbon nanotubes using the method HorvathKawazoe, Saito and Foley and BJH equations. *Micro Nano Lett* 2017;12:1–5.
- [40] Jagiello J, Thommes M. Comparison of DFT characterization methods based on N₂, Ar, CO₂, and H₂ adsorption applied to carbons with various pore size distributions. *Carbon N Y* 2004;42:1227–32.
- [41] Thue PS, Umpierrez CS, Lima EC, Lima DR, Machado FM, dos Reis GS, da Silva RS, Pavan FA, Tran HN. Single-step pyrolysis for producing magnetic activated carbon from tucuma (~ *Astrocaryum aculeatum*) seed and nickel(II) chloride and zinc(II) chloride. Application for removal of Nicotinamide and Propanolol. *J Hazard Mater* 2020;398:122903. doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.122903.
- [42] Saucier C, Karthikeyan P, Ranjithkumar V, Lima EC, dos Reis GS, de Brum IAS. Efficient removal of amoxicillin and paracetamol from aqueous solutions using magnetic-activated carbon. *Environ Sci Pollut Res* 2017;24:5918–32.
- [43] Dos Reis GS, Sampaio CH, Lima EC, Wilhelm M. Preparation of novel adsorbents based on combinations of polysiloxanes and sewage sludge to remove pharmaceuticals from aqueous solutions. *Colloids Surf A: Physicochem Eng Aspects* 2016;497:304–15.
- [44] Umpierrez CS, Thue PS, dos Reis GS, de Brum IAS, Lima EC, de Alencar WA, Dias SLP, Dotto GL. Microwave activated carbons from Tucuma (*Astrocaryum aculeatum*) waste for efficient removal of 2-nitrophenol from aqueous solutions. *Environ Technol* 2018;39:1173–87.
- [45] Lima DR, Hosseini-Bandegharai A, Thue PS, Lima EC, de Albuquerque YRT, dos Reis GS, Umpierrez CS, Dias SLP, Tran HN. Efficient acetaminophen removal from water and hospital effluents treatment by activated carbons derived from Brazil nutshells. *Colloids Surf A: Physicochem Eng Aspects* 2019;583:123966. doi: 10.1016/j.colsurfa.2019.123966.
- [46] Kasperiski FM, Lima EC, Umpierrez CS, dos Reis GS, Thue PS, Lima DR, Dias SLP, Saucier C, da Costa JB. Production of porous activated carbons from *Caesalpinia ferrea* seed pod wastes: highly efficient removal of Captopril from aqueous solutions. *J Clean Prod* 2018;197:919–29.
- [47] Lima EC, Brasil JL, Santos AHDP. Evaluation of Rh, Ir, Ru, W-Rh, W-Ir, and W-Ru as permanent modifiers for the determination of lead in ashes, coals, sediments, sludges, soils, and freshwaters by electrothermal atomic absorption spectrometry. *Anal Chim Acta* 2003;484:233–42.
- [48] Lima EC, Barbosa Jr. F, Krug FJ. The use of tungsten-rhodium permanent chemical modifier for cadmium determination in decomposed samples of biological materials and sediments by electrothermal atomic absorption spectrometry. *Anal Chim Acta* 2000;409:267–74.
- [49] Lima EC, Barbosa Jr. F, Krug FJ, Guaita U. Tungsten-rhodium permanent chemical modifier for lead determination in digests of biological materials and sediments by electrothermal atomic absorption spectrometry. *J Anal At Spectrom* 1999;14:1601–5.
- [50] Lima EC, Fenga PG, Romero JR, de Giovani WF. Electrochemical behavior of [Ru (4,40 -Me₂bpy)₂(PPh₃)(H₂O)](ClO₄)₂ in homogeneous solution and incorporated into carbon paste electrodes. Application to oxidation of benzylic compounds. *Polyhedron* 1998;17:313–8.
- [51] Lima, E.C., Adebayo, M.A., Machado, F.M. Chapter 3: kinetic and equilibrium models of adsorption, in carbon nanomaterials as adsorbents for environmental and biological applications, C.P. Bergmann, F.M. Machado, editors Springer International Publishing, 2015 pp. 3369.
- [52] Lima EC, Hosseini-Bandegharai A, Moreno-Piraján JC, Anastopoulos I. A critical review of the estimation of the thermodynamic parameters on adsorption equilibria. Wrong use of equilibrium constant in the Van't Hoff equation for calculation of thermodynamic parameters of adsorption. *J Mol Liq* 2019;273:425–34.
- [53] Lima EC, Sher F, Guleria A, Saeb MR, Anastopoulos I, Tran HN, Hosseini-Bandegharai A. Is one performing the treatment data of adsorption kinetics correctly? *J Environ Chem Eng* 2021;9:104813. doi: 10.1016/j.jece.2020.104813.



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil
26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG
25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental
Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

ANÁLISE DA INCORPORAÇÃO DO PÓ DE CARNAÚBA SOBRE A PERMEABILIDADE DE UM GEOPOLÍMERO

P. I. R. Santos ⁽¹⁾
A. V. Rodrigues ⁽²⁾
S.R. Bragança ⁽³⁾

RESUMO

Um dos grandes desafios para a construção civil é encontrar materiais alternativos que possam reduzir ou até mesmo substituir o cimento Portland, tendo um baixo consumo de energia e baixa emissão de gases do efeito estufa durante seu processo produtivo. Este estudo teve como objetivo principal analisar o efeito da incorporação do pó de carnaúba no geopolímero a fim de reduzir sua permeabilidade, aumentando assim sua durabilidade. Para esta pesquisa, foram fabricadas duas séries de geopolímeros, sendo uma série tomada como referencial (sem incorporação do pó de carnaúba) e a outra com 5% de pó de carnaúba incorporado. A incorporação do pó de carnaúba atribuiu ao geopolímero uma redução nas propriedades de absorção de ~9,5% e permeabilidade de ~55%.

Palavras-chave: durabilidade, geopolímero, pó de carnaúba, permeabilidade, absorção.

Abstract

One of the great challenges for civil construction is to find alternative materials that can reduce or even replace Portland cement, with low energy consumption and low greenhouse gas emissions during its production process. The aim of this study was to analyze the effect of incorporating carnauba powder into the geopolymer in order to reduce its permeability, thus increasing its durability. For this research, two series of geopolymers were manufactured, one series being taken as a reference (without incorporation of carnauba powder) and the other with 5% of incorporated carnauba powder. The incorporation of carnauba powder attributed to the geopolymer a reduction in the absorption properties of ~9.5% and permeability of ~55%.

Keywords: durability, geopolymer, carnauba powder, permeability, absorption.

⁽¹⁾ Eng. Pedro Ivo Rocha Santos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

⁽²⁾ M.Sc. Adalberto Viana Rodrigues, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

⁽³⁾ Prof. Dr. Saulo Roca Bragança., Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

1. INTRODUÇÃO

O concreto é o produto mais utilizado no mundo devido à sua disponibilidade, versatilidade, baixo custo e altas propriedades estruturais [1]. A produção do cimento Portland, principal componente do concreto, consome cerca de 5% da energia industrial e é responsável por 7% de toda a emissão de CO₂ no mundo [2]-[4]. As emissões de CO₂ na atmosfera são responsáveis por cerca de 65% do aquecimento global [5]. Além disso, a produção de Cimento Portland está aumentando cerca de 3% a cada ano, e sabe-se que 1 tonelada de CO₂ é emitida quando 1 tonelada de Cimento Portland é produzida [5]. Essa alta emissão cria uma situação alarmante porque o aumento do CO₂ afeta as condições ambientais, como o aumento da temperatura e da pressão atmosférica. Este aumento pode afetar a adsorção de CO₂ na superfície da sílica amorfa e alterar a natureza amorfa dos materiais durante a etapa de cristalização. A produção de cimento é, portanto, considerada insustentável devido às altas emissões de gases do efeito estufa [6].

A construção sustentável e a produção de materiais são, portanto, os principais focos da indústria global da construção, o que incentiva os pesquisadores a desenvolver outras alternativas que substituem parcial ou totalmente o cimento comum. Uma das novas tecnologias alternativas na indústria da construção é o cimento geopolimérico. A implementação dessa tecnologia leva ao desenvolvimento sustentável, reduz as emissões globais de CO₂ e garante um ambiente mais limpo a longo prazo. O aluminossilicato (utilizado com precursor no geopolímero) pode ser usado como um substituto completo do cimento Portland, reduzindo as emissões de CO₂ em até 80% em comparação com o cimento Portland [1]. O geopolímero é cada vez mais utilizado devido às suas muitas vantagens, como a construção sustentável, vida útil mais longa, baixa emissão de carbono, utilização de resíduos industriais reciclados, possui propriedades duráveis e sua alta resistência [7], mas devido à falta de códigos de projeto e dados confiáveis, o seu alto custo de produção, e a alta retração, ainda possui uma aplicação estrutural limitada [8]-[9].

Recentemente, o desenvolvimento sustentável tem sido discutido em todo o mundo, obrigando-nos a usar o mínimo possível de recursos naturais. À medida que a modernização avança, o descarte de resíduos sólidos industriais perigosos, como lama vermelha, cinzas volante e escória, a contaminação por metais pesados, corantes e drogas, tornou-se uma preocupação pública. A maior parte da produção mundial de cinza volante acaba em aterros ou lagoas de cinzas, onde representam uma grande ameaça ambiental, pois as partículas transportadas pelo ar ficam presas e as substâncias tóxicas são lixiviadas no solo ou na água [10]. Em 2017, as emissões de lama vermelha da China ultrapassaram 3,5 milhões de toneladas, e a taxa de consumo de reutilização foi de apenas 5,24% [11]. O acúmulo maciço de lama vermelha causa sérios danos ambientais com problemas ecológicos, como contaminação de águas superficiais e subterrâneas e alcalinização do solo [12]-[13]. O uso de materiais geopoliméricos pode efetivamente resolver os problemas acima. Atualmente, muitas pesquisas estão sendo feitas com base em geopolímeros misturados. Por um lado, todos os tipos de matérias-primas se complementam. Por outro lado, podem efetivamente reduzir o uso de recursos naturais.

A carnaúba é uma palmeira xerófita da família Arecaceae, cujo nome científico é Copernícia Prunifera, espécie nativa do Brasil. Atinge alturas de 10-15 metros e tem uma vida útil estimada de 200 anos [14]. A palmeira da carnaúba é muito resistente e se adapta bem a secas severas e alagamentos. Esta árvore possui folhas verdes opacas encontradas na copa da planta disposta em círculos ao redor do tronco. Todas as partes da carnaúba podem ser aproveitadas: a raiz é usada medicinalmente; os frutos são constantemente utilizados como ração animal; os caules são usados como madeira para construção civil; as ceras (extraídas pela fervura do pó da palha) são amplamente utilizadas na produção de lubrificantes e anticorrosivos; as folhas são utilizadas para cobrir casas, fazer artesanato e como fibras [15]. No presente trabalho, estuda-se o emprego do pó da palha de Carnaúba como aditivo em cimento geopolimérico.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Apresentam-se nesse tópico os materiais utilizados, assim como os processos para a produção e análise dos corpos de prova. Eles foram preparados e moldados conforme a NBR 5738.

2.1. Materiais

2.1.1. Precursor

Para a produção dos geopolímeros, foi utilizada uma argila que foi levada ao forno até a temperatura de queima de 750°C, em seguida, ela foi levada ao moinho de bolas durante 4 horas. Após, a argila foi retirada do moinho e foi levada para queima novamente até a temperatura de 750°C. A queima desse material acontece para que ele entre em fase amorfa, obtendo a maior reatividade.

2.1.2. Ativador

O ativador utilizado para a produção do geopolímero é composto por uma mistura de hidróxido de sódio (NaOH) e silicato de sódio (Na₂SiO₃).

2.1.3. Agregado miúdo

Foi utilizado um agregado miúdo (areia) com modulo de finura de 3,5.

2.1.4. Pó de carnaúba

O pó de carnaúba foi passado na peneira #200 ABNT, com diâmetro de partículas de 75 µm.

2.2. Métodos

2.2.1 Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica

O ensaio de absorção por capilaridade foi realizado de acordo com a NBR 9778. Entretanto, preferiu-se utilizar corpos de prova cilíndricos com 24 mm de diâmetro e 48 mm de altura. A justificativa para utilizar esses corpos de prova, vem do fato que seria necessário um grande volume de argamassa para produzir corpos de prova maiores, elevando consideravelmente o custo e o tempo para a produção dos corpos de prova. Para esse ensaio, foram utilizados com dois traços diferentes. Em cada traço, foram moldados CPs (corpos de prova) como referência (sem pó de carnaúba) e CPs com 5% de pó de carnaúba incorporado.



Figura 1: Corpos de prova

Após 7 dias, que os corpos de prova haviam sido moldados, eles foram levados para a estufa e mantidos a temperatura de 100 ± 5 °C por um período de 72 horas. Em seguida, eles foram retirados da estufa e mantidos no laboratório até eles atingirem a temperatura ambiente de 23 ± 2 °C e a sua massa seca (m_s) foi determinada.

Após a determinação da massa seca, os corpos de prova foram imersos em água por 72 horas. Posteriormente, foi determinada a massa imersa (m_i) através de Arquimedes. Em seguida, para a determinação da massa saturada (m_{sat}), os corpos de prova eram previamente enxugados com auxílio de um pano úmido, e sua massa era determinada.



Figura 2: Determinação da massa imersa

2.2.1.1 Absorção

A absorção (A) é dada pela equação 1:

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (1)$$

Onde,

m_{sat} é a massa saturada do corpo de prova após ser colocado em contato com a água – g; m_s é a massa do corpo de prova seco – g;

2.2.1.2 Índice de vazios

O índice de vazios (I_v) é dado pela equação 2:

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (2)$$

Onde,

m_i é a massa da amostra imersa em água – g;

2.2.1.3 Massa específica da amostra seca

A massa específica da amostra seca (ρ_s) é dada pela equação 3:

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (3)$$

2.2.1.4 Massa específica da amostra saturada

A massa específica da amostra saturada (ρ_{sat}) é dada pela equação 4:

$$\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \quad (4)$$

2.2.1.5 Massa específica real

A massa específica real (ρ_r) é dada pela equação 5:

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (5)$$

O objetivo da realização desse teste foi analisar qual a influência da incorporação do pó de carnaúba nos corpos de prova em relação a absorção, índice de vazios, massa específica da amostra seca, massa específica da amostra saturada e massa específica real.

2.2.2 Determinação da absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção por capilaridade foi realizado de acordo com a NBR 9779. Entretanto, preferiu-se utilizar corpos de prova cilíndricos com 24 mm de diâmetro e 48 mm de altura, pelo mesmo motivo explicado anteriormente. Para esse ensaio, trabalhou-se com os mesmos traços já citados: CPs como referência (sem pó de carnaúba) e CPs com 5% de pó de carnaúba.

Após 7 dias, que os corpos de prova haviam sido moldados, eles foram levados para a estufa e mantidos a temperatura de $100 \pm 5^\circ\text{C}$ até a constância de massa. Em seguida, eles foram retirados da estufa e mantidos no laboratório até eles atingirem a temperatura ambiente de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e a sua massa seca (m_s) foi determinada.

A realização desse ensaio consistiu em posicionar os CPs sobre suportes, de modo que eles ficassem em contato com uma lâmina d'água constante de 5 ± 1 mm. Para a determinação da massa saturada (m_{sat}), os corpos de prova eram previamente enxugados com auxílio de um pano úmido, era determinada a sua massa e eles retornavam ao contato com a lâmina de água até a próxima pesagem, ou final do ensaio. Essa massa saturada foi determinada após 3, 6, 24, 48 e 72 horas, em que os CPs estavam em contato com a lâmina d'água.



Figura 3: Corpos de prova em contato com lâmina de água

O coeficiente de absorção por capilaridade é dado pela equação 6:

$$C = \frac{m_{sat} - m_s}{S} \quad (6)$$

Onde,

C é a absorção por capilaridade – g/cm²; Msat é a massa saturada do corpo de prova após ser colocado em contato com a água – g; Ms é a massa do corpo de prova seco – g; S é a área da seção transversal em contato com a lâmina de água – cm²;

O objetivo da realização desse ensaio foi analisar qual a influência da incorporação do pó de carnaúba nos CPs em relação a absorção por capilaridade.

3. RESULTADOS

Ao realizar o programa experimental proposto neste estudo, confirmou-se que a inclusão do pó de carnaúba afeta a permeabilidade e a absorção do geopolímero. A permeabilidade do geopolímero diz muito sobre sua durabilidade. Quanto maior a permeabilidade do geopolímero, mais suscetível ele fica ao ataque de substâncias agressivas, muitas das quais são solúveis em água.

As tabelas abaixo demonstram a influência positiva do pó de carnaúba na diminuição da taxa de permeabilidade do geopolímero, observada através do ensaio baseado na NBR 9778 – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.

Tabela 1: Resultados obtidos pelo ensaio de determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.

TRAÇO	1:1:0.5	REF							0,0%
CP	MASSA SECA (g)	MASSA IMERSA (g)	MASSA SATURADA (g)	ABSORÇÃO (A)	ÍNDICE DE VAZIOS (Iv)	MASSA ESPECÍFICA DA AMOSTRA SECA	MASSA ESPECÍFICA DA AMOSTRA SATURADA	MASSA ESPECÍFICA REAL	
A	44,372	22,261	46,441	4,66	8,56	1,83	1,92	2,01	
B	44,704	23,386	46,758	4,59	8,79	1,91	2,00	2,10	
C	43,766	24,11	46,116	5,37	10,68	1,99	2,09	2,23	
MÉDIA				4,66	8,79	1,91	2,00	2,10	

Tabela 2: Resultados obtidos pelo ensaio de determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica (com 5% de pó de carnaúba).

TRAÇO	1:1:0.5							5,0%
CP	MASSA SECA (g)	MASSA IMERSA (g)	MASSA SATURADA (g)	ABSORÇÃO (A)	ÍNDICE DE VAZIOS (lv)	MASSA ESPECÍFICA DA AMOSTRA SECA	MASSA ESPECÍFICA DA AMOSTRA SATURADA	MASSA ESPECÍFICA REAL
D	43,005	22,094	44,82	4,22	7,99	1,89	1,97	2,06
E	42,985	22,622	44,92	4,50	8,68	1,93	2,01	2,12
F	43,201	22,67	44,982	4,12	7,98	1,93	2,02	2,10
MÉDIA				4,22	7,99	1,93	2,01	2,10

Com o intuito de avaliar melhor a permeabilidade do geopolímero, procedeu-se com a execução do ensaio realizado baseado na NBR 9779 – Determinação da absorção de água por capilaridade. A seguir as tabelas demonstram a influência positiva do pó de carnaúba na diminuição da taxa de permeabilidade do geopolímero.

Tabela 3: Resultados obtidos pelo ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade.

TRAÇO	1:1:0.5	REF						0,0%
CP	ALTURA (mm)	MASSA SECA (g)	MASSA SATURADA - 3H (g)	MASSA SATURADA - 6H (g)	MASSA SATURADA - 24H (g)	MASSA SATURADA - 48H (g)	MASSA SATURADA - 72H (g)	CAPILARIDADE (g/cm ²)
K	45,32	43,396	45,282	45,637	46,085	46,571	46,707	0,73
L	46,17	44,405	46,339	46,629	47,216	47,441	47,885	0,77
M	46,04	44,72	46,247	46,918	47,299	47,471	47,947	0,71
N	46,13	44,685	46,702	47,096	47,49	47,617	47,777	0,68
MÉDIA								0,72

Tabela 4: Resultados obtidos pelo ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade (com 5% de pó de carnaúba).

TRAÇO	1:1:0.5							5,0%
CP	ALTURA (mm)	MASSA SECA (g)	MASSA SATURADA - 3H (g)	MASSA SATURADA - 6H (g)	MASSA SATURADA - 24H (g)	MASSA SATURADA - 48H (g)	MASSA SATURADA - 72H (g)	CAPILARIDADE (g/cm ²)
O	46,31	43,275	43,561	43,7	44,195	44,624	44,85	0,35
P	46,23	43,283	43,586	43,72	44,246	44,597	44,832	0,34
Q	46,39	43,309	43,555	43,677	44,193	44,527	44,763	0,32
R	46,58	43,678	43,94	44,059	44,516	44,854	45,054	0,30
MÉDIA								0,33

4. CONCLUSÕES

Sabe-se que muitas variáveis influenciam na permeabilidade e absorção do geopolímero. A partir dos resultados obtidos, pode-se ratificar a ideia presente na literatura de que a incorporação do pó de carnaúba no geopolímero ocasiona uma diminuição na absorção de água de 9,5% e também causa uma diminuição na permeabilidade de 55%. Assim, como a permeabilidade é um fator que determina a durabilidade do geopolímero, pode-se dizer que a durabilidade das estruturas de geopolímeros são melhoradas quando o pó de carnaúba é adicionado.

Com os resultados obtidos neste estudo, pode-se concluir que a adição do pó de carnaúba aumentou as propriedades que determinam a durabilidade dos geopolímeros, justificando o seu uso como aditivo.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores oferecem a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), pelo apoio institucional. A CAPES, e ao CNPQ, pelo apoio financeiro. Ao Laboratório de Materiais Cerâmicos

(LACER), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M), pelos equipamentos, espaço físico e financiamento dos materiais utilizados neste estudo.

REFERÊNCIAS

- [1] Zang,Z.; Provis, J. L.; Reid, A.; Wang, H., Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction. *Constr. Build. Mater.* **2014**, 56, 113-127
- [2] Aliabdo, A.A.; Elmoaty, A.E.M.A.; Emam, M.A., Factors affecting the mechanical properties of alkali activated ground granulated blast furnace slag concrete. *Constr. Build. Mater.* **2019**, 197, 339-355
- [3] Rashad, A.M., A comprehensive overview about the influence of different additives on the properties of alkali-activated slag – A guide for civil engineer. *Constr. Build. Mater.* **2013**, 47, 29-55.
- [4] Bhikshma, V.; Koti, R.M.; Srinivas, R.T. An experimental investigation on properties of geopolymer concrete (no cement concrete). *Asian J. Civ. Eng. (Build. Hous.)* **2012**, 13, 841-853.
- [5] Mccaffrey, R., Climate change and the cement industry. *Glob. Cem. Lime Mag. Environ. Spec. Issue* **2002**, 15, 19.
- [6] WMO. Greenhouse Gas. Bulletin: The State of the Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2018. 2019.
- [7] Hassan, A.; Arif, M.; Shariq, M. Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment – A review of mechanical properties and microstructure. *J. Clean. Prod.* **2019**, 223, 704-728.
- [8] Kumar, H.; Prasad, R.; Srivastava, A.; Khan, M., Utilization of industrial waste (Fly ash) in synthesis of copper based surface composite through friction stir processing route for wear applications. *J. Clean. Prod.* **2018**, 196, 460-468.
- [9] Ma, C.-K; Awang, A.Z.; Omar, W. Structural and material performance of geopolymer concrete: A review. *Constr. Build. Mater.* **2018**, 186, 90-102.
- [10] Dindi, A., Quang, D.V., Vega, L.F., et al., 2019. Applications of fly ash for CO2 capture, utilization, and storage. *Journal of CO2 Utilization* 29, 82-102.
- [11] Huang, G.D., Ji, Y., Li, J., et al., 2018. Improving strength of calcinated coal gangue geopolymer mortars via increasing calcium content. *Construction and building Materials* 166, 760-768.
- [12] Yang, Z., Mocadlo, R., Zhao, M., et al., 2019. Preparation of a geopolymer from red mud slurry abd class F fly ash and its behavior at elevated temperatures. *Construction and building Materials* 221, 308-317.
- [13] Lorenzine H, Sousa H, Coelho LS, Medeiros J, Nikolaus B., Palmeiras do Brasil. Nova Odessa: São Paulo: Plantarum; 1996.
- [14] Melo JDD, Carvalho LFM, Medeiros AM, Souto CRO, Paskocimas CA., A biodegradable composite material based on polyhydroxybutyrate (PHB) and carnauba fibers. *Composites: Part B.* 2012.



42º SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil

26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis

12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

1

COMPOSITE OF METHYL POLYSILOXANE AND AVOCADO BIOCHAR AS ADSORBENT FOR REMOVAL OF CIPROFLOXACIN FROM WATERS

Paula da Cruz ⁽¹⁾
Éder Cláudio Lima ⁽¹⁾
Pascal Silas Thue ⁽²⁾
Beatris Lisbôa Mello ⁽¹⁾
Roberta Arlêu Teixeira ⁽¹⁾
Pâmela Vianini da Silva ⁽¹⁾
Amanda Elisa Giovanaz ⁽¹⁾
Julio César Pacheco Vaghetti ⁽¹⁾
Fernando Marchioro Kasperiski ⁽³⁾
Flávio André Pavan ⁽⁴⁾

ABSTRACT

Two composite materials were prepared by mixing methyl polysiloxane (MK) and avocado biochar. This synthesis can be characterized by dissolving MK in ethanol for subsequent addition of avocado biochar at different times. In sample 1 (R₁), the biochar addition time was immediately after the MK dissolution; while in sample 2 (R₂), the addition of biochar occurred 48 hours after the MK dissolution. These materials adsorbents were characterized by nitrogen adsorption/desorption, FTIR and Raman spectroscopy, CHN elemental analysis, thermal analysis, Bohem titration and pH_{pzc}. The adsorbents were used to remove the antibiotic ciprofloxacin from the water. The maximum adsorption capacities based on the Liu isotherm were 10.77 mg·g⁻¹ (R₁) and 63.80 mg·g⁻¹ (R₂) for ciprofloxacin. Thermodynamic studies demonstrated a spontaneous and exothermic process for the two adsorbents.

Keywords: methyl polysiloxane and biochar composite, pharmaceutical adsorption, adsorption thermodynamics, synthetic effluents.

⁽¹⁾ Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil

⁽²⁾ Federal University of Pelotas, Brazil

⁽³⁾ Federal University of Health Sciences of Porto Alegre, Brazil

⁽⁴⁾ Federal University of Pampa, Bagé campus, Brazil

1. INTRODUCTION

Releases of contaminants of emerging concerns (CECs) to water bodies have been a critical environmental concern in the last years [1] because these compounds can distress the aquatic ecosystem [2]. These CECs come from the pesticides, pharmaceutical, textile, petrochemical industries, human and animal excretions, and hospital effluents [1]. One pharmaceutical class of relevant concern to the environment is the antibiotic class, which humans and livestock frequently employ. The release of antibiotics into water bodies could generate microbial resistance [3,4]; therefore, its removal from water is relevant.

The municipal wastewater treatment plants present failures in removing antibiotics and other CECs (Wang et al. 2021b) completely. Therefore, tertiary water treatment procedures are necessary to complete the removal of CECs [5,6]. Adsorption is preferable for antibiotic-loaded wastewater treatment due to its low-initial effectuation costs, easy operation, and high adsorption effectiveness of CECs from wastewaters [7,8,9,10,11]

The most commonly employed adsorbent utilized to remove pharmaceuticals from aqueous effluents is activated carbon [12,13] and other carbon-based adsorbents such as biochar [10]. On the other hand, different composite materials [14,7,8,9,15,16,17] are used as alternatives to activated carbons. In addition, adsorbents derived from polysiloxanes have been utilized to remove pharmaceuticals [8,18]

Polysiloxane composite materials have benefits as adsorbents, such as high stability at a higher temperature, better mechanical strength, no swelling [8], and the facility of being chemically modified and functionalized because of the presence of free silanol groups on their surfaces [19]. On the other hand, polysiloxane's hybrid materials are more costly adsorbents than biochar and other biomass-based materials produced from low-cost biomass precursors [20,21].

Avocado seed corresponds to approximately one quarter of the total fruit [22]. The annual production of avocado in Brazil surpasses 240,000 tons, which will generate about 60,000 tons of avocado seed [23]. In addition, the preparation of activated biochar from avocado seed as an adsorbent has been reported in the literature [22,24,25]; however, this material presents the drawbacks of low mechanical strength.

Therefore, combining avocado seed biochar and synthetic polysiloxane material precursors and producing a new composite material seems to be a clever strategy to use a biomass-based material and polysiloxane to obtain adsorbent with mechanical strength and good sorption capacity. Furthermore, this composite material should present rigidity and elevated hydrophilic behavior, and it could be used as adsorbents for a large number of CECs.

For the first time, the production of new composite adsorbent materials is reported using avocado biochar and methyl polysiloxane (MK) at a 1:0.5 ratio. Firstly MK was dissolved in ethanol, and then the avocado biochar was added at different times. In sample 1 (R_1), the time of adding biochar was immediately after dissolving MK in ethanol, and in sample 2 (R_2), after 48 h of MK dissolved in ethanol. Subsequently, different analytical techniques fully characterized the samples R_1 and R_2 . The adsorbents R_1 and R_2 were used to remove ciprofloxacin antibiotic (CIP) from aqueous effluents.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Preparation of polysiloxane and biochar

The avocado biochar was prepared by carbonizing 50 grams of avocado seed powder at 500 °C using the conditions previously described [24]. Composite adsorbents prepared from avocado biochar and MK polysiloxane were prepared following the procedure. Briefly, 5 grams MK was dissolved in 50 mL ethanol, and immediately after the dissolution of MK (about 15 minutes), 10 of avocado biochar was added and 0.5 mL NH_3 . The system was kept under reflux at 70 °C for 48 hours. Afterward, the heating was stopped, the reaction mixture was filtered, and the product was washed with water + ethanol mixture (1:1). Finally, the product was dried at 130 °C for 12 hours. This first

product was called (R₁). Then, a second procedure was carried out when the avocado biochar was added after 48 hours of dissolution of MK in water in the presence of NH₃ solution. In this case, the biochar was added after hydrolysis, and polycondensation of MK was already taken (R₂) before adding avocado biochar. The reaction mixture was stirred for 1 hour, and then the reaction was stopped, and the final product was washed with ethanol+water (1:1) and dried at 130° for 12 hours (R₂).

2.2. Characterizations of the polysiloxane and the biochar

Nitrogen adsorption/desorption isotherm analysis (Tristar 3000 apparatus, Micrometrics Instrument Corp.) was carried out to determine the surface area (BET method) (Thommes et al. 2015) and the volume of pores (by DFT method) (Jagiello and Thommes, 2004). Before the analysis, the sample was degassed at 100 °C for 2 hours in a nitrogen flow.

As previously described, the hydrophobic-hydrophilic ratio (HI) was performed [26,27]. In addition, the pH_{pzc} of the R₁ and R₂ samples were obtained as described elsewhere [28,26]. The elemental analysis (CHN) was performed utilizing a Perkin Elmer analyzer [28,26].

An adapted Boehm-titration procedure was used to quantify the total amount of acidic and basic groups. The functional groups of the materials were qualitatively determined by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) (Bruker spectrometer) using KBr pellets. In addition, Raman spectra were obtained using a Bruker Bravo spectrometer [29]. The thermal stability of R₁ and R₂ was performed by TGA analysis (TA model SDT Q600) as previously described [28,9].

2.3. Batch adsorption experiments

An aliquot of 20 mL of ciprofloxacin solution with the initial concentration varying from 5 to 200 mg.L⁻¹ was added to 50.0-mL fat Falcon tubes with 30.0 milligrams of R₁ and R₂ composite samples at pH ranging 2–10. The Falcon tubes were capped and disposed of horizontally inside a thermostatic reciprocating agitator. The slurries were shaken at different time intervals between 1 and 360 minutes at 10° to 45 °C with a shaking speed of 120 strikes per minute (Teixeira et al. 2021). Subsequently, the solid phase was separated from the liquid phase by centrifugation. When necessary, aliquots of 1–10 mL of the liquid phase were diluted to 1–25 mL in calibrated volumetric flasks using the blank solution. Ciprofloxacin unadsorbed after the adsorption process was measured using the T90+PG Instruments spectrophotometer at a maximum absorption wavelength of 273.0 nm [12].

The study of the influence of the initial pH of ciprofloxacin was performed at 25 °C, using an initial concentration of 100 mg.L⁻¹ of the pharmaceutical solution, a time of contact between the adsorbent and adsorbates of 2 hours, an adsorbent dosage of 1.5 g L⁻¹, and pH ranging from 2 to 10.

The values of R²_{adj}, SD, and BIC will be presented to compare different models of kinetics and equilibrium presented in this work. The best-fitted model would present R²_{adj} closer to 1, lower values of SD, and BIC values. However, the kinetic and equilibrium model could not merely be chosen based on the values of R² [30,31]. (Lima et al. 2021a, 2021b) when these models present a different number of parameters. Therefore, it is necessary to check if the R² values' improvements are due to the increase of a number of the parameters [30,31] or if, physically, the model with more parameters explains better the process taking place [30,31].

However, the difference in BIC values between models could be conclusive if the difference in BIC values ≤ 2 [30,31]. When the difference in BIC values is between 2–6, there is a positive perspective that the model with the lowest BIC is the most suitable [30,31]. For variations in BIC values from 6 to 10, there is a strong possibility that the model with the lowest BIC value is the best model to be fitted]. However, if the difference in BIC values ≥ 10, it can be accurately predicted that the model with the lower BIC value is better fitted [30,31].

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Textural characteristics

Figure 1 shows the isotherms of adsorption and desorption of N₂ and the pore size distribution curves according to the DFT method for R₁ and R₂ composite samples. There is a remarkable difference in the textural properties of composite materials. The R₁ sample presents a surface area of 115 m².g⁻¹ and a total pore volume of 0.0713 cm³.g⁻¹. Conversely, the R₂ sample presents a surface area of 580 m².g⁻¹ and a total pore volume of 0.364 cm³.g⁻¹. The pore size distribution curves of the materials seem to be a mixture of microporous materials (pore diameter < 2 nm) and mesopores with diameter < 8 nm (Fig. 1B and D).

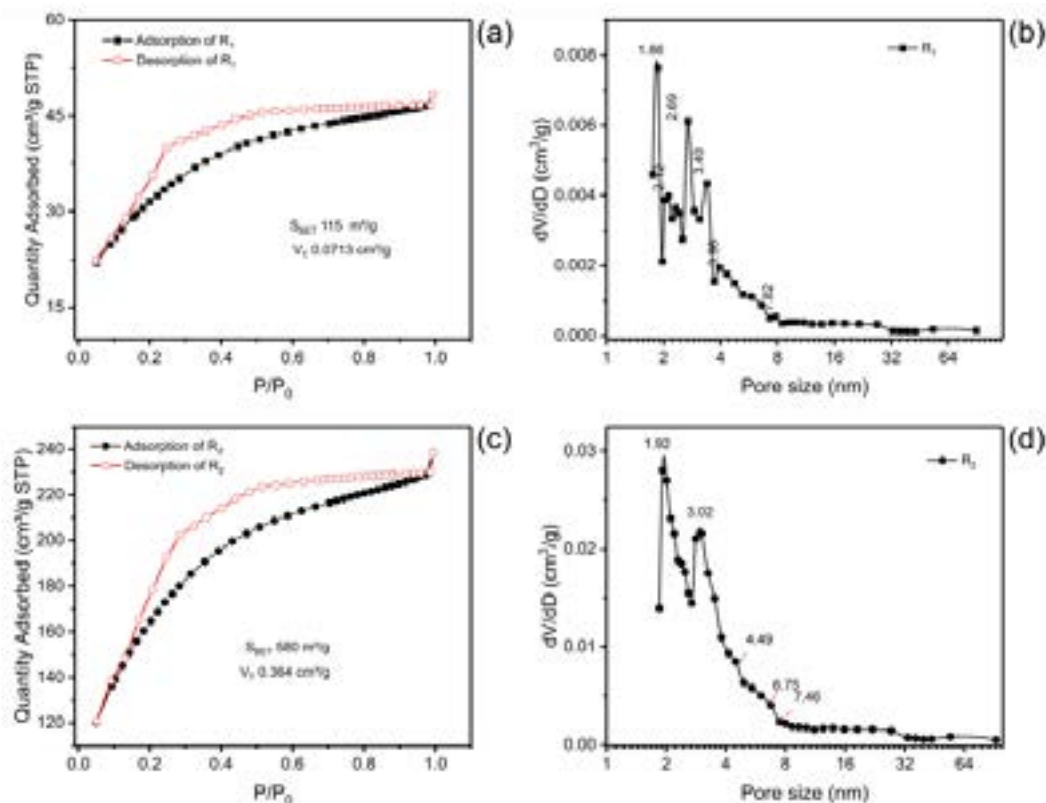


Figure 1: Textural characteristics of R₁ and R₂ samples. (a) Isotherm of adsorption of R₁; (b) pore size distribution of R₁; (c) isotherm of adsorption of R₂; (d) pore size distribution of R₂.

It is expected that R₂ composite material would present a higher sorption capacity for removal of ciprofloxacin from waters than R₁ due to the higher surface area and total pore volume [8,9]. This enhancement of the expected sorption capacity of R₂ material over R₁ is due to the pore-filling mechanism. Although this mechanism is essential for removing solutes dissolved in water, it is not the unique mechanism that should be considered [20,21].

3.2. Qualitative analysis

With the aim of identifying the main functional groups present on the surface of the R₁ and R₂ composite materials, FTIR spectra were recorded, contributing to a better understanding of how the composite materials could interact with the ciprofloxacin adsorbate (see Figure 2).

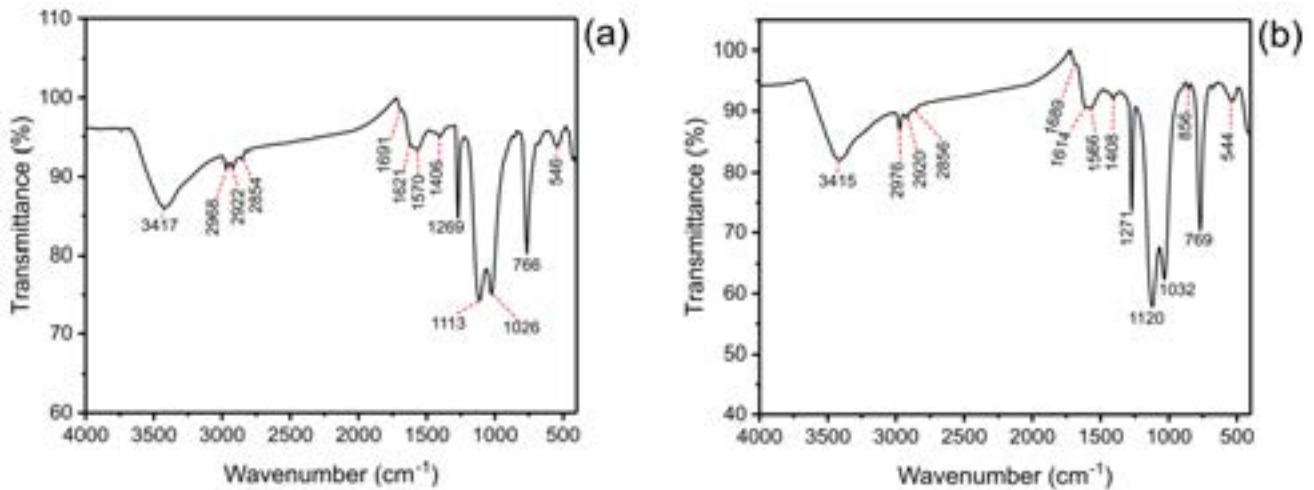


Figure 2: FTIR spectra: (a) R₁ and (b) R₂.

Both composite materials present very similar FTIR spectra. The band at 3417 (R₁) and 3415 cm⁻¹ (R₂) corresponds to the stretching of the -OH group [12, 7]. The bands at 1691 (R₁) and 1689 cm⁻¹ (R₂) are assigned to the stretching of the C=O carboxylic acid functional group in biochar [29,26]. The bands at 1621 and 1570 (R₁) and 1614 and 1566 cm⁻¹ (R₂) are attributed to aromatic rings [8,10]. A broadening of these bands was observed, that is, characteristics of organo-silicate materials [8,26]. In addition, the bands at 1570 (R₁) and 1566 cm⁻¹ (R₂) can also be attributed to the overlap of NH₂ bending bands with aromatic rings [8,26]

(dos Reis et al. 2016; Teixeira et al. 2021). The bands at 1269 (R₁) and 1271 cm⁻¹ (R₂) are assigned to the C-O stretching of the phenolic group present on the biochar [28] or alternatively to Si-CH₃ of MK present in both samples [8,26]. The bands at 1110 (R₁), and 1120 cm⁻¹ (R₂) are assigned to C-O of secondary alcohols present in the biochar. Both composite materials present a band at 1026 (R₁), and 1032 cm⁻¹ (R₂) attributed to the Si-O-Si stretch of composite material [8,26] or primary alcohol C-O [20,21]. The band at 766 (R₁) and 769 cm⁻¹ (R₂) are attributed to Si-O stretching [19,21].

Raman spectroscopy was carried out to explore the structure and degree of graphitization of the R₁ and R₂ composite materials. Two distinct Raman shifts are observed in the spectra. The first one (D-band), centered at 1332 cm⁻¹, is assigned to sp³ electronic states (considered defects in the planar sp² graphitic structure) corresponding to graphite's low symmetry carbon structure [32]. The second band (G-band), centered at 1592 cm⁻¹, reflects the structural integrity of sp² - hybridized carbon atoms [32]. The Raman spectra of composites R₁ and R₂ can be found in Figure 3.

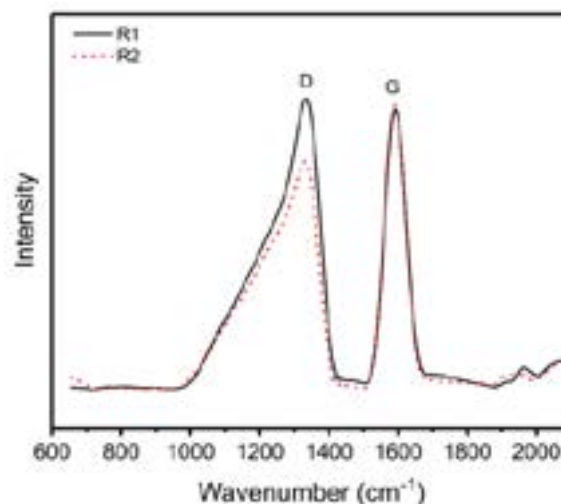


Figure 3: Raman spectra.

The qualities of the samples were evaluated by comparing the D to G band intensity (the ID/IG ratio). The ID/IG ratio is often below a couple of percent for high quality samples with higher graphitization. Therefore, higher ID/IG ratio values mean carbon structure with several defects, and low values mean carbon samples with a higher organization [32]. The value of ID/IG for R_1 was 1.04, and for R_2 , it was 0.800. These results show that the grafting of MK polysiloxane onto avocado biochar led to a more organized R_2 composite sample when less MK is grafted in the biochar.

3.3. Quantitative analysis

The thermogravimetric analysis of composite samples R_1 and R_2 can be found in Figure 4. The thermal behavior of both composite samples is similar, presenting three main weight losses. This analysis used nitrogen from room temperature to 800 °C and then from 800 to 1000 °C; the atmosphere was changed from inert to oxidizing using synthetic air [20,28,26,9].

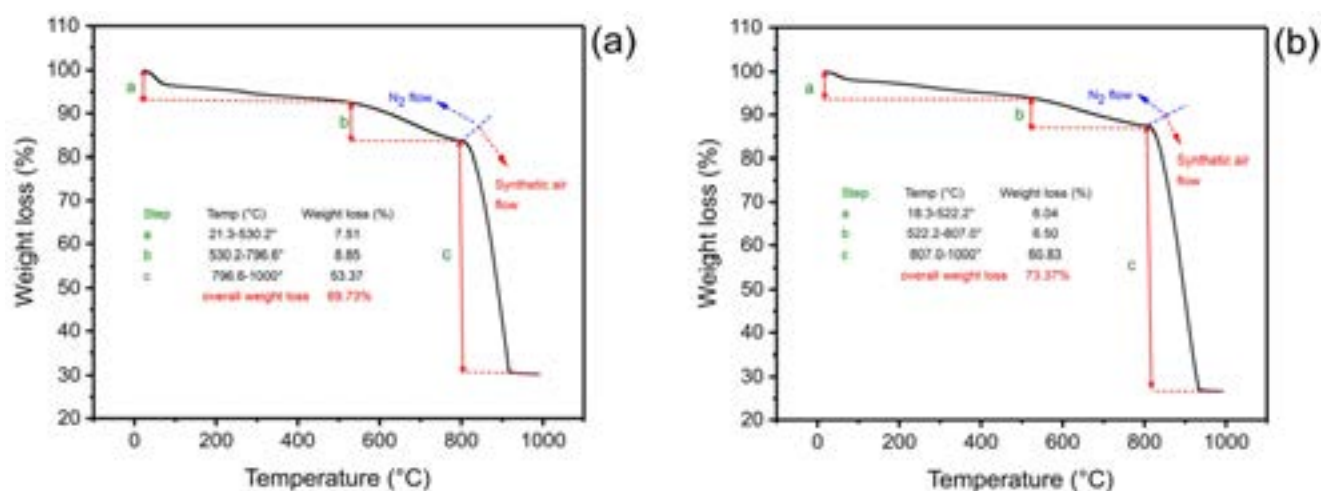


Figure 4: TGA analysis: (a) R_1 and (b) R_2 . From room temperature up to 800 °C, the gas utilized was N_2 . From 800 to 1000 °C, the gas utilized was synthetic air

In the first stage, 21.3–530.2 °C (R_1) and 18.3–522.2 °C (R_2) comprise water losses associated with some small decomposition of volatile organics present in the avocado biochar [20,24,28,26] or the loss of the methyl group present in MK siloxane [8]. However, these weight losses were only 7.51% (R_1) and 6.04% (R_2), showing the high thermal stability of both samples. In turn, the weight loss in the second stage was also not very significant for both samples (8.85% R_1 and 6.50% R_2), which indicates that from room temperature to close to 800 °C, the weight loss total weight under nitrogen stream was 16.36% (R_1) and 12.54% (R_2). These values indicate that both composite materials have very high thermal stability.

In the third stage, under a synthetic air atmosphere, weight losses increased notably to 53.37% (R_1) and 60.83% (R_2). This third weight loss corresponds to the total degradation of the carbonaceous matrix of the composite materials, leading to a total weight loss including the three phases of up to 69.73% (R_1) and 73.37% (R_2). Therefore, the residual mass left in the crucible was 30.27% (R_1), and 26.63% (R_2) could be attributed to the ashes of the composite samples, since the third stage was conducted under a synthetic air atmosphere [20,28,26,9].

Based on the content of these residues, it is possible to infer that the content of MK incorporated in R_1 was higher than in sample R_2 . This result is consistent with the exposure time of avocado biochar with MK polysiloxane. In sample R_1 , avocado biochar was added immediately after dissolving MK in ethanol, and remained together for 48 hours of contact. On the other hand, for sample R_2 , avocado biochar was added after 48 hours of dissolving the MK polysiloxane in ethanol, allowing the formation of MK oligomers in ethanol, adding the avocado biochar and keeping it together for just one hour of contact.

The CHN elemental analysis is depicted in Table 1. The contents of carbon present in R₁ are compatible with a higher composite formation between avocado biochar and MK polysiloxane because then its value is lower (53.64% C) when compared with the R₂ sample (61.22% C), and also the value is also compatible with the contents of ashes determined by TGA analysis, described previously. The contents of H and N were also determined by CHN elemental analysis, and the values also are depicted in Table 1. The atomic ratio C/H is 1.20 (R₁) and 1.71 (R₂). The closer the C/H atomic ratio is to 2, the greater the degree of aromatization. On the other hand, when the C/H atomic ratio is closer to 1, the aliphatic portion will be larger [32].

The methyl group number of polysiloxane MK will be higher when more of this MK is grafted onto the biochar. Therefore, the values of the elemental analysis of CHN are compatible with a greater amount of MK grafted into R₁ when compared to sample R₂.

The total acidity and basicity of the composite samples were quantified using the Bohem titration [33,34], and the content of these groups is represented in Table 1. The higher the sum of acid-base groups, the more polar the surface of the adsorbent. In turn, the pH_{pzc} values of R₁ and R₂ were 5.09 and 4.91, respectively (Table 1), showing no notable difference in the acidity behavior of these two composite materials.

The HI values of samples R₁ and R₂ are also shown in Table 1. The HI values were 1.725 (R₁) and 1.051 (R₂). Higher HI values mean a greater tendency of the adsorbent surface to capture hydrophobic molecules. The sum of the most basic acidic groups was 0.2081 mmol g⁻¹ (R₁) and 0.5742 (R₂). Comparing the HI values with the sum of the polar groups (acidic plus basic groups), it can be observed that a greater number of polar groups leads to a low HI value, as previously observed in cases already reported in the literature [20,8,28,22,26,21]. Another important correlation is that the greater the amount of MK incorporated, the greater the hydrophobicity and HI value. Considering that sample R₁ presented a greater amount of MK grafted onto biochar, this material has a higher HI value.

Table 1: CHN elemental analysis, HI, total acidity and total basicity, and pH_{pzc} for R₁ and R₂ composites.

	C (%)	H (%)	N (%)	Ashes(%)	Total acidity (mmol g ⁻¹)	Total basicity (mmol g ⁻¹)	HI	pH _{pzc}
R ₁	53.64	3.76	1.05	30.27	0.1025	0.1056	1.725	5.09
R ₂	61.22	3.01	1.14	26.63	0.2617	0.3125	1.051	4.91

3.4. Effect of pH

The influence of the initial pH of the adsorbate solution on the sorption capacity is one of the main variables that can affect the absorption of a molecule on an adsorbent [25,10].

The pH_{pzc} value also influences the sorption capacity of the adsorbent. For pH values >pH_{pzc}, the adsorbent surface becomes negatively charged, and for pH values < pH_{pzc}, the adsorbent surface becomes positively charged [22,28]. Furthermore, adsorbate pKa values influence the sorption capacity of an adsorbent. The pKa values of ciprofloxacin are pKa₁ 5.56 and pKa₂ 8.77 and, as a consequence, ciprofloxacin has three species with different proportions depending on the pH value. The zwitterionic species is predominant at pH 7. Tests of the effect of the initial CIP pH ranging from 3.5 to 12 demonstrated that the percentage of CIP removal did not undergo notable variation (changes < 2.3%). Then, in the next adsorption experiments, the pH of the adsorbate solution was set at 7 to continue this research.

It is important to highlight that at pH 7 the surface of samples R₁ and R₂ will be negatively charged; however, the predominant CIP species is a zwitterionic species (94.84%) [12]; therefore, electrostatic attraction of the quaternary ammonium salt with the negatively charged adsorbent could occur.

3.5. Kinetic studies

The kinetics adsorption data of the ciprofloxacin antibiotic onto R_1 and R_2 composite samples were carried out utilizing the pseudo-first order (PFO), pseudo-second order (PSO), and Avrami fractional order [28], and the kinetic curves are shown in Figure 5.

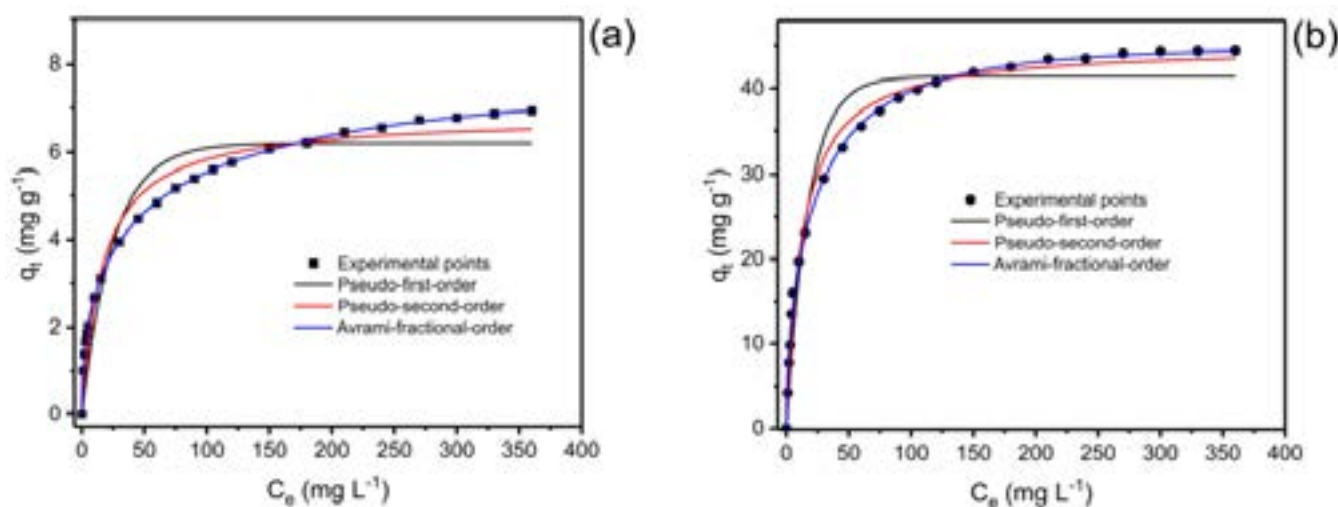


Figure 5: Kinetic Curves for ciprofloxacin adsorption onto (a) R_1 and (b) R_2 composite adsorbents. Conditions: the initial ciprofloxacin concentration was 100 mg.L^{-1} , the temperature was fixed at $25 \text{ }^\circ\text{C}$, the adsorbent dosage of 1.5 g.L^{-1} , and initial pH of the adsorbate solution was 7.

The values of R^2_{adj} , SD, and BIC show that the Avrami fractional-order kinetic adsorption model was the unique model that described the kinetic adsorption data well because the values of R^2_{adj} are closer to 1 and the values of SD and BIC were lower than compared with PFO and PSO. The ΔBIC between PFO and Avrami and PSO and Avrami were, respectively, 156.7 and 134.5 for R_1 adsorbent and 65.09 and 28.52 for R_2 adsorbent. Therefore, the statistical analysis confirms that the Avrami fractional kinetic model describes the adsorption kinetics for removal of the ciprofloxacin using R_1 and R_2 adsorbents.

Considering that it is not easy to compare different kinetic models because the constant rates present different units, the values of $t_{1/2}$ and $t_{0.95}$ were obtained by interpolation in the fitted curve for the time necessary to attain 50% and 95% of the saturation, respectively [28,26,27]. These time parameters mean the time necessary to attain 50% and 95% of the saturation, respectively. Considering that the Avrami fractional-order kinetic model was the best-fitted model, it can be assumed that the times to attain 95% of saturation were 246.4 minutes (R_1) and 157.6 minutes (R_2). Based on this result, it was established that the equilibrium studies should employ a contact time between the adsorbent and the adsorbate of 300 minutes (R_1) and 180 minutes (R_2) for performing these experiments.

3.6. Equilibrium and thermodynamic studies and adsorption mechanism

Equilibrium adsorption studies of ciprofloxacin on composite samples R_1 and R_2 were carried out from 10 to $45 \text{ }^\circ\text{C}$. The Langmuir, Freundlich and Liu equilibrium models evaluated the removal of ciprofloxacin. The results are represented in Figure 6 (R_1) and Figure 7 (R_2).

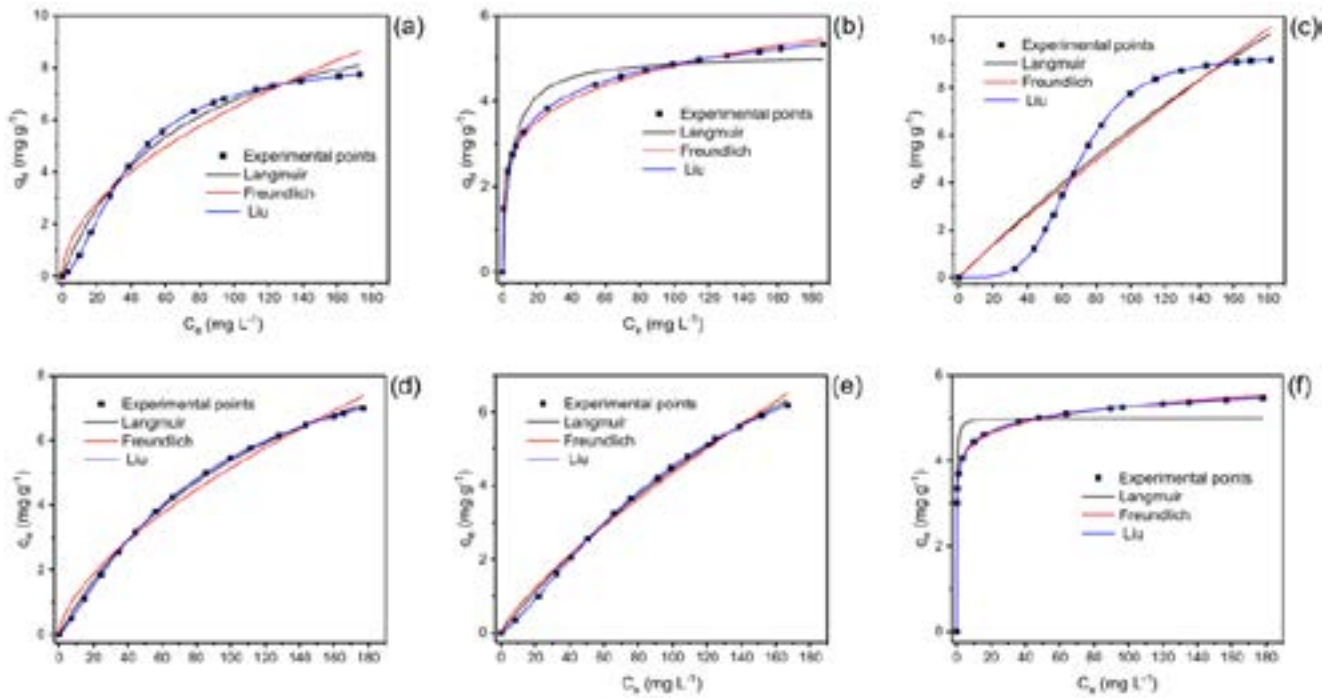


Figure 6: Isotherms of adsorption of CIP on R₁ adsorbent. (a) 10 °C; (b) 20 °C; (c) 25 °C; (d) 30 °C; (e) 40 °C; (f) 45 °C. Conditions: time of contact 300 minutes between CIP and R₁; adsorbent dosage 1.5 g.L⁻¹; initial pH 7.

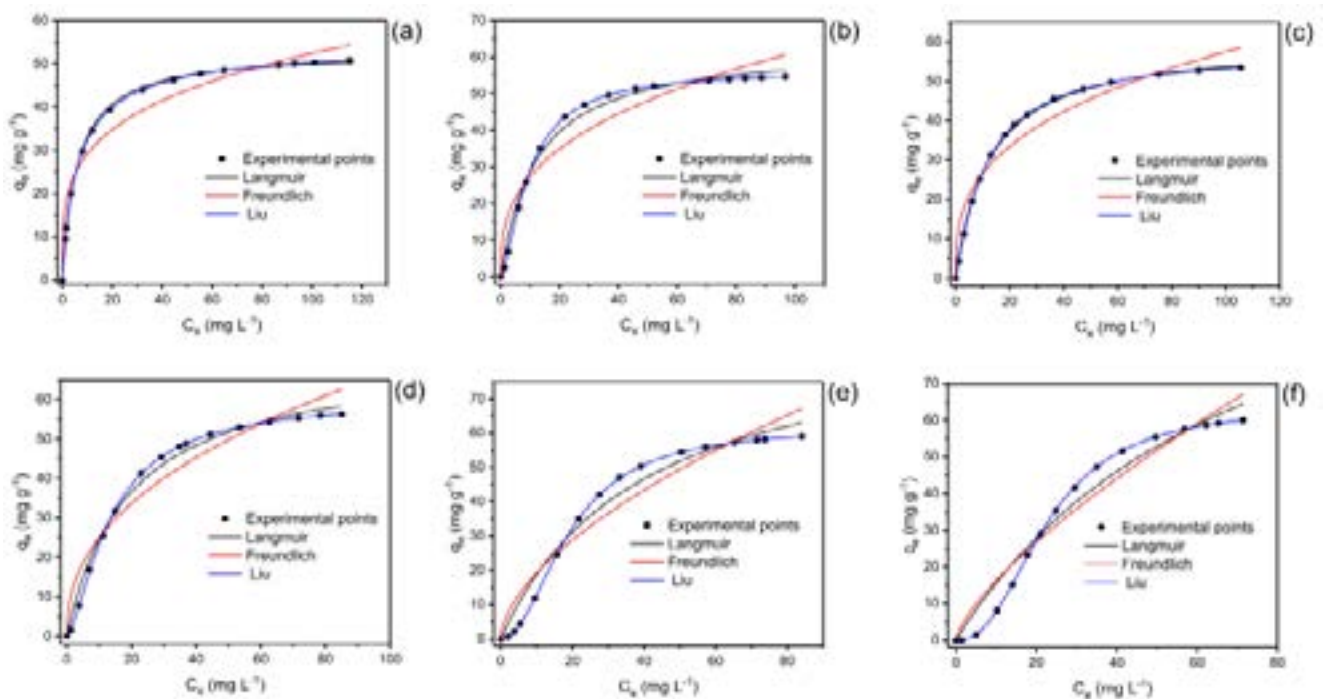


Figure 7: Isotherms of adsorption of CIP on R₂ adsorbent. (a) 10 °C; (b) 20 °C; (c) 25 °C; (d) 30 °C; (e) 40 °C; (f) 45 °C. Conditions: time of contact 180 minutes between CIP and R₂; adsorbent dosage 1.5 g.L⁻¹; initial pH 7.

Liu's equilibrium model was the best equilibrium model for all temperatures studied (10 to 45 °C) due to R^2_{adj} being closer to 1 and the lower BIC and SD values. The ΔBIC between Langmuir and Liu ranged from 50 to 220.4 (10–45 °C) using adsorbent R₁ and 72.46 to 206.9 (10–45 °C) using adsorbent R₂ [30,31]. The ΔBIC between Freundlich and Liu ranged from 69.18 to 141.8 for adsorbent R₁ and ranged from 107.3 to 241.1 for adsorbent R₂. Therefore, the ΔBIC values were much higher than 10, which allows us to state that the Liu isothermal model was the best equilibrium model to explain the equilibrium data for the adsorption of ciprofloxacin on the composite samples R₁ and R₂ at a

temperature of 10–45°C.

Regarding thermodynamic parameters, it is important to highlight that the enthalpy variation was negative (exothermic process) for the removal of ciprofloxacin in both composite samples, and the entropy variation was also negative. These results show that CIP after adsorption must be in a more organized state than free in the aqueous solution before adsorption occurs [30]. Furthermore, considering the magnitude of the enthalpy, the values obtained for both adsorbents are compatible with a physical interaction of the CIP with composite samples R₁ and R₂ [22,24,30]. The adsorption process is controlled by enthalpy because the process is exothermic, which contributes to ΔG^\square being negative over the entire temperature range (283–318 K).

When the ciprofloxacin is placed with the composite materials R₁ or R₂, the cationic ammonium group of CIP has an acid–base interaction with donor groups present on the biochar part of the composite material [10]. In addition, the anionic group of CIP interacts with OH groups present on the biochar, forming hydrogen bonding [22,10]. Also, CIP presents a fluoride group that could form halogen bonding with the biochar or with the silane group on R₁ and R₂ [35]. CIP also could form π - π interactions with the aromatic rings present on the biochar part of the composite samples [22,10]. Besides the polar interactions, CIP could also interact with hydrophobic interactions (van der Waals forces) with the silane group present on the composite samples [26,10,27]. As a result, the silane groups increase the R₁ composite sample's hydrophobicity compared with the R₂ composite sample.

On the other hand, higher coverage of the biochar with silane groups would impair the polar interactions of CIP with the polar groups present on the biochar. Therefore, this statement is justified that the R₁ composite sample presents more Si contents than the R₂ sample. Moreover, a pore-filling mechanism explains the removal of the CIP by the composite samples, being the composite material with higher surface area and higher total pore volume (R₂) the sample that presented higher sorption capacity to ciprofloxacin antibiotic.

4. CONCLUSION

Two composite materials were prepared by mixing MK polysiloxane with avocado biochar. The synthesis route of both materials is practically the same, only changing the time for the addition of the avocado biochar to the dissolved MK solution in ethanol. The first composite material (R₁), the addition of avocado biochar, was immediately after dissolving the MK in ethanol at reflux. The second composite material (R₂), the addition of avocado biochar, was after 48 hours dissolution of MK polysiloxane in ethanol, continuing the reflux for 1 hour. The characterization of the R₁ and R₂ composite samples was carried out by isotherms of adsorption and desorption of nitrogen, which show that the surface area and total pore volume of R₂ were more than 5 times higher than R₁.

Furthermore, results of TGA analysis revealed that the amount of Si contents present on R₁ was higher than R₂, which provoked a higher hydrophobicity of R₁ (HI 1.725) than R₂ (1.051). In addition, the R₂ composite presented a higher number of functional groups (acidic plus basic groups) than R₁. The kinetic experiments of adsorption show that the CIP uptake was faster in R₂ ($t_{1/2}$ 14.00, $t_{0.95}$ 157.6 minutes) when compared to R₁ composite sample ($t_{1/2}$ 20.52, $t_{0.95}$ 264.4 minutes). This faster kinetics is due to the higher pore volume of R₂ material. The equilibrium studies of R₁ and R₂ composite samples were obtained from 10 to 45 °C (283–318 K) using three isotherm models. The best-fitted equilibrium results were obtained using the Liu isotherm model. The thermodynamic studies indicated that the adsorption process was favorable, spontaneous, and exothermic, and the magnitude of enthalpy changes was consistent with physical adsorption.

REFERENCES

- [1] Sophia CA, Lima EC (2018) Removal of emerging contaminants from the environment by adsorption. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 150:1–17.

- [2] Ma L, Liu Y, Yang Q, Jiang L, Li G (2022) Occurrence and distribution of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in wastewater-related riverbank groundwater. *Science of The Total Environment*, 82:1–10.
- [3] Qiu W, Sun J, Fang M, Luo S, Tian Y, Dong P, Xu B, Zheng C (2019) Occurrence of antibiotics in the main rivers of Shenzhen, China: association with antibiotic resistance genes and microbial Community. *Science of The Total Environment*, 653:334–341.
- [4] Bondarczuk K, Piotrowska-Seget Z (2019) Microbial diversity and antibiotic resistance in a final effluent-receiving lake. *Science of The Total Environment*, 650:2951–2961.
- [5] Arefi-Oskoui S, Khataee A, Behrouz SJ, Vatanpour V, Gharamaleki SH, Orooji Y, Safarpour M (2022) Development of MoS₂/O-MWCNTs/PES blended membrane for efficient removal of dyes, antibiotics, and protein. *Separation and Purification Technology*, 280:1–14.
- [6] Tian Y, Yao S, Zhou L, Hu Y, Lei J, Wang L, Zhang J, Liu Y, Cui C (2022) Efficient removal of antibiotic-resistant bacteria and intracellular antibiotic resistance genes by heterogeneous activation of peroxymonosulfate on hierarchical macro-mesoporous Co₃O₄-SiO₂ with enhanced photogenerated charges. *Journal of Hazardous Materials*, 430:1–10.
- [7] Caicedo DF, dos Reis GS, Lima EC, de Brum IAS, Thue PS, Cazacliu BG, Lima DR, dos Santos AH, Dotto GL (2020) Efficient adsorbent based on construction and demolition wastes functionalized with 3-aminopropyltriethoxysilane (APTES) for the removal ciprofloxacin from hospital synthetic effluents. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8:1–7.
- [8] dos Reis GS, Sampaio CH, Lima EC, Wilhelm M (2016) Preparation of novel adsorbents based on combinations of polysiloxanes and sewage sludge to remove pharmaceuticals from aqueous solutions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 497:304–315.
- [9] Thue PS, Umpierrez CS, Lima EC, Lima DR, Machado FM, dos Reis GS, da Silva RS, Pavan FA, Tran HN (2020) Single-step pyrolysis for producing magnetic activated carbon from tucumã (*Astrocaryum aculeatum*) seed and nickel(II) chloride and zinc (II) chloride. Application for removal of Nicotinamide and Propranolol. *Journal of Hazardous Materials*, 398:1–13.
- [10] Tomul F, Arslan Y, Kabak B, Trak D, Kendüzler E, Lima EC, Tran HN (2020) Peanut shells-derived biochars prepared from different carbonization processes: comparison of characterization and mechanism of naproxen adsorption in water. *Science of The Total Environment*, 726:1–16.
- [11] Yazidi A, Sellaoui L, Badawi M, Lima EC, Bonilla-Petriciolet A, Thue PS, Cimirro NFGM (2020) Lamine AB (2020) Physicochemical interpretation of the adsorption of 4-Bromophenol and 4-chloroaniline on activated carbon. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8:104542.
- [12] de Oliveira Carvalho C, Rodrigues DLC, Lima EC, Umpierrez CS, Caicedo DF, Machado FM (2019) Kinetic, equilibrium, and thermodynamic studies on the adsorption of ciprofloxacin by activated carbon produced from Jerivá (*Syagrus Romanzofana*). *Environmental Science and Pollution Research*, 26:4690–4702.
- [13] Hanafy H, Li Z, Sellaoui L, Yazidi A, Wang H, Lima EC, Cimirro NFGM, Lamine AB, Erto A (2021) Theoretical interpretation of the adsorption of amoxicillin on activated carbon via physical model. *Environmental Science and Pollution Research*, 28:30714–30721.
- [14] Arif M, Liu G, Zia urRehman M, Yousaf B, Ahmed R, Mian MM, Ashraf A, Munir MAM, Rashid MS, Naeem A (2022) Carbon dioxide activated biochar-clay mineral composite efficiently Environmental Science and Pollution Research (2022) 29:74823–74840 74837 1 3 removes ciprofloxacin from contaminated water - reveals an incubation study. *Journal of Cleaner Production*, 332:1–14.
- [15] Guellati A, Maachi R, Chaabane T, Darchen A, Danish M (2022) Aluminum dispersed bamboo activated carbon production for effective removal of Ciprofloxacin hydrochloride antibiotics: optimization and mechanism study. *Journal of Environmental Management*, 301:1–11.
- [16] Khan NA, Najam T, Shah SSA, Hussain E, Ali H, Hussain S, Shaheen A, Ahmad K, Ashfaq M (2020) Development of Mn-PBA on GO sheets for adsorptive removal of ciprofloxacin from water:

- Kinetics, isothermal, thermodynamic, and mechanistic studies. *Materials Chemistry and Physics*, 245:1–11.
- [17] Magesh N, Annam Renita A, Siva R, Harirajan N, Santhosh A (2022) Adsorption behavior of fluoroquinolone (ciprofloxacin) using zinc oxide impregnated activated carbon prepared from jack fruit peel: kinetics and isotherm studies. *Chemosphere* 290:1– 10.
- [18] Kollarahithlu SC, Balakrishnan RM (2021) Adsorption of pharmaceuticals pollutants, ibuprofen, acetaminophen, and streptomycin from the aqueous phase using amine-functionalized superparamagnetic silica nanocomposite. *Journal of Cleaner Production*, 294:1–9.
- [19] Çok SS, Gizli N (2020) Hydrophobic silica aerogels synthesized in ambient conditions by preserving the pore structure via two-step silylation. *Ceramics International*, 46:27789–27799.
- [20] Cunha MR, Lima EC, Lima DR, da Silva RS, Thue PS, Seliem MK, Sher F, dos Reis GS, Larsson SH (2020) Removal of captopril pharmaceutical from synthetic pharmaceutical-industry wastewaters: use of activated carbon derived from *Butia catarinensis*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8:1–9.
- [21] Thue PS, Lima EC, Sieliechi JM, Saucier C, Dias SLP, Vagheti JCP, Rodembusch FS, Pavan FA (2017) Effects of first-row transition metals and impregnation ratios on the physicochemical properties of microwave-assisted activated carbons from wood biomass. *Journal of Colloid and Interface Science*, 486:163–175.
- [22] Leite AJB, Sophia AC, Thue PS, dos Reis GS, Dias SLP, Lima EC, Vagheti JCP, Pavan FA, de Alencar WS (2017) Activated carbon from avocado seeds for the removal of phenolic compounds from aqueous solutions. *Desalination and Water Treatment*, 71:168–181.
- [23] STATISTA (2020). Production of avocado in Brazil from 2013 to 2019. Available in: <<https://www.statista.com/statistics/934976/brazil-avocado-production-volume/>>. The website was visited on February 19th, 2022.
- [24] Leite AJB, Saucier C, Lima EC, dos Reis GS, Umpierres CS, Mello BL, Shirmardi M, Dias SLP, Sampaio CH (2018) Activated carbons from avocado seed: optimization and application for removal several emerging organic compounds. *Environmental Science and Pollution Research*, 25:7647–7661.
- [25] Kudo MVF, de Oliveira LLG, Suquila FAC, de Almeida FG, Segatelli MG, Lima EC, Dias SLP, Tarley CRT (2020) Performance of avocado seed activated carbon as adsorbent for highly sensitive determination of Cd using a flow injection system online coupled to TS-FF-AAS. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 31:100–108.
- [26] Teixeira RA, Lima EC, Benetti AD, Thue PS, Cunha MR, Cimirro NFGM, Sher F, Dehghani MH, dos Reis GS, Dotto GL (2021) Preparation of hybrids of wood sawdust with 3-aminopropyltriethoxysilane. Application as an adsorbent to remove Reactive Blue 4 dye from wastewater effluents. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 125:141–152.
- [27] Wamba AGN, Lima EC, Ndi SK, Thue PS, Kayem JG, Rodembusch FS, dos Reis GS, de Alencar WS (2017) Synthesis of grafted natural pozzolan with 3-aminopropyltriethoxysilane: preparation, characterization, and application for removal of Brilliant Green 1 and Reactive Black 5 from aqueous solutions. *Environmental Science and Pollution Research*, 24:21807–21820.
- [28] Lima DR, Lima EC, Umpierres CS, Thue PS, El-Chaghaby GA, da Silva RS, Pavan FA, Dias SP, Biron C (2019) Removal of amoxicillin from simulated hospital effluents by adsorption using activated carbons prepared from capsules of cashew of Para. *Environmental Science and Pollution Research*, 26:16396–16408.
- [29] Guy M, Mathieu M, Anastopoulos IP, Martínez MG, Rousseau F, Dotto GL, de Oliveira HP, Lima EC, Thyrel M, Larsson SH, dos Reis GS (2022) Process parameters optimization, characterization, and application of KOH-activated Norway spruce bark graphitic biochars for efficient azo dye adsorption. *Molecules*, 27:1–25.

- [30] Lima EC, Sher F, Guleria A, Saeb MR, Anastopoulos I, Tran HN, Hosseini-Bandegharai A (2021) Is one performing the treatment data of adsorption kinetics correctly? *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9:1–9.
- [31] Lima EC, Dehghani MH, Guleria A, Sher F, Karri RR, Dotto GL, Tran HN (2021) Adsorption: Fundamental aspects and applications of adsorption for effluent treatment. In: Dehghani MH, Karri R, Lima EC (eds.) *Green Technologies for the Defluoridation of Water*. Elsevier, p. 41–88.
- [32] dos Reis GS, Guy M, Mathieu M, Jebrane M, Lima EC, Thyrel M, Dotto GL, Larsson SH (2022) A comparative study of chemical treatment by $MgCl_2$, $ZnSO_4$, $ZnCl_2$, and KOH on physicochemical properties and acetaminophen adsorption performance of biobased porous materials from tree bark residues. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 642:1–13.
- [33] Goertzen SL, Theriault KD, Oickle AM, Tarasuk AC, Andreas HA (2010) Standardisation of the Boehm titration. Part I. CO_2 expulsion and endpoint determination. *Carbon*, 48:1252–1261.
- [34] Oickle AM, Goertzen SL, Hopper KR, Abdalla YO, Andreas HA (2010) Standardisation of the Boehm titration: Part II. Method of agitation, the effect of filtering, and dilute titrant. *Carbon*, 48:3313–3322.
- [35] Desiraju GR, Ho PS, Kloo L, Legon AC, Marquardt R, Metrangolo P, Politzer P, Resnat G, Rissanen K (2013) Definition of the halogen bond (IUPAC Recommendations 2013). *Pure and Applied Chemistry*, 85:1711–1713.

DIFERENTES PROCESSOS DE TRATAMENTO TÉRMICO DO AÇO SAE 4150 VISANDO A SUBSTITUIÇÃO DO PROCESSO DE AUSTÊMPERA: EFEITO SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS E METALÚRGICAS

Michele Cicolatto da Rosa ⁽¹⁾; Maria Gabriela de Souza Zeferino ⁽²⁾; Bruno Jardel Budke ⁽³⁾; Augusto Reichelt Maders ⁽⁴⁾; Jonatha Skieres de Lima ⁽⁵⁾; Bruno Rodrigues da Silva ⁽⁶⁾; Célia de Fraga Malfatti ⁽⁷⁾;

ABSTRACT

A austêmpera é um processo de tratamento térmico que envolve resfriamento controlado dentro de faixas de temperatura específicas. Alguns processos de austêmpera envolvem o uso de banhos de sal, que podem conter substâncias químicas nocivas ou poluentes. Para controlar os efeitos deletérios que este processo pode ocasionar, existem regulamentações em vigor, como o Título V da Lei do Ar Limpo (Clean air act) definida pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), que vigora o controle de poluentes e emissões atmosféricas, inclusive em indústrias. Diante a este fato, muitas empresas buscam alternativas para substituição do processo de austêmpera. O objetivo deste trabalho é avaliar a influência de diferentes tratamentos térmicos na microestrutura e propriedades mecânicas do aço SAE 4150, a fim de avaliar qual é o processo de tratamento térmico mais adequado para uma aplicação que exige alta resistência mecânica e boa tenacidade. Os processos de tratamento térmico utilizados neste estudo foram escolhidos com base nos tratamentos térmicos mais comuns empregados para aços, visando obter as seguintes microestruturas: bainita e martensita. Os processos empregados para obter essas microestruturas foram: austêmpera em banho de sal e o processo de têmpera e revenimento convencionais em forno do tipo *batch*, onde para ambos os processos foi objetivado obter mesma faixa de dureza (37-42HRC) após o revenimento. Foram realizadas análises metalúrgicas das amostras, incluindo análise metalográfica por microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura. Também foi realizada a análise de composição química por espectrometria óptica. A caracterização mecânica foi realizada de acordo com as normas ABNT NBR ISO 148-1:2013 e ABNT NBR ISO 6892-1:2013, tanto para as amostras na condição inicial (como recebido) quanto após os tratamentos térmicos. Como resultados, foi verificado que o maior alongamento foi da amostra bainítica revenida, onde houve um aumento de 10% em relação à amostra martensítica revenida. Enquanto isso, a resistência à tração teve uma redução de 4% para esta mesma relação. Quanto a energia absorvida, ocorreu uma redução de 32% para esta relação. Em relação as análises microscópicas, é possível identificar a presença da microestrutura lamelar acompanhada da ferrita pró-eutetóide, no aço tal como recebido. Para a microestrutura bainítica inferior, foi possível distinguir a microestrutura pela presença de agulhas de ferrita.

Key words — Tratamento térmico, Austêmpera, Têmpera, Propriedades mecânicas, Microestruturas.

1. INTRODUÇÃO

Diferentes tratamentos térmicos são utilizados comercialmente com o objetivo de modificar as propriedades mecânicas e físicas de produtos finais, sem alterar sua forma. O objetivo deste trabalho é avaliar a influência de diferentes microestruturas, resultantes de distintos tratamentos térmicos, nas propriedades mecânicas do aço SAE 4150, a fim de avaliar qual é o processo de tratamento térmico mais adequado para uma aplicação na

⁽¹⁾ Autora principal; Engenheira Metalúrgica – UFRGS; MBA gestão de projetos FADERGS;

⁽²⁾ Graduanda em Engenharia de Materiais – UFRGS;

⁽³⁾ Graduando em Engenharia Mecânica – UNISINOS,

⁽⁴⁾ Engenheiro Metalúrgico – UFRGS;

⁽⁵⁾ Engenheiro Metalúrgico – UFRGS ;

⁽⁶⁾ Técnico metalúrgico – CNEC/ RS;

⁽⁷⁾ Profª. Dra. – UFRGS e Université Toulouse III;

qual exige um bom comportamento mediante a esforços mecânicos, nos quais exigem alta resistência mecânica, boa tenacidade e alongamento. Além disso, os banhos de sais utilizados no processo de austêmpera necessitam de acompanhamento ambiental rigoroso e promovem um ambiente de alta insalubridade para a operação. Esse fato motiva muitas empresas a buscarem alternativas para esse processo.

Os processos de tratamento térmico utilizados neste estudo foram escolhidos com base nos tratamentos térmicos mais comuns empregados industrialmente para aços, visando obter as seguintes microestruturas: bainita revenida e martensita revenida. Os processos empregados para obter essas microestruturas foram: austêmpera em banho de sal e têmpera e revenimento convencionais em forno do tipo *batch* com pressão atmosférica. Os parâmetros utilizados em cada processo foram obtidos a partir da curva TTT do material e considerando a microestrutura alvo. Foram realizadas análises metalúrgicas das amostras, incluindo análise metalográfica por microscópio óptico e microscópio eletrônico de varredura. Também foi realizada a análise de composição química por espectrometria óptica e medição de dureza. A caracterização mecânica foi realizada de acordo com as normas ABNT NBR ISO 148-1:2013 e ABNT NBR ISO 6892-1:2013, tanto para as amostras na condição inicial (como recebido) quanto após os tratamentos térmicos. Este trabalho contribui para um projeto que visa compreender o comportamento mecânico do aço SAE 4150 com diferentes microestruturas, buscando alternativas para os processos atuais de austêmpera bem como, para avaliar o impacto dessas alterações nas propriedades mecânicas das amostras.

1.1 TIPOS DE MICROESTRUTURAS

1.1.1. Martensita

Após um processo de resfriamento rápido da austenita, é possível obter uma fase metaestável conhecida como martensita. Essa fase apresenta características de alta dureza e resistência mecânica, porém tem comportamento frágil, resultando em baixa tenacidade [4][5][9][11].

A martensita é uma solução sólida supersaturada do carbono no ferro, assumindo uma estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC), a partir da distorção do reticulado cúbico de corpo centrado (CCC) do ferro. Essa distorção ocorre devido a um mecanismo adifusional no qual envolve um processo de cisalhamento. Esse processo leva ao aumento da densidade de discordâncias e distorções na estrutura cristalina, contribuindo para a elevada dureza e resistência mecânica da martensita [4][9].

É importante observar que o teor de carbono no aço influencia a temperatura de início e fim da formação da martensita, além de afetar a morfologia dessa microestrutura. Aços com menor teor de carbono resultam em martensita em ripas, caracterizada por uma subestrutura interna dominada por discordâncias. Enquanto aços com teor de carbono mais elevado resultam em martensita com morfologia de agulhas individuais e acircular, exibindo uma subestrutura predominante de maclas. Para teores intermediários de carbono, a microestrutura da martensita apresentará características morfológicas mistas [3][5][9].

1.1.2. Bainita

O processo de austêmpera resulta em uma microestrutura bainítica, que combina notável resistência e tenacidade em um nível de dureza equivalente. Tanto a bainita quanto a perlita são constituídas de ferrita e cementita. No entanto, o mecanismo de nucleação e crescimento envolvido na sua transformação difere, assim como a morfologia das fases. Enquanto a perlita assume um arranjo lamelar, a bainita apresenta uma morfologia de agulhas ou placas finas [4][5][11]. Sendo classificada em dois tipos:

Bainita superior: caracteriza-se por aglomerados de cristais ferríticos organizados em forma de ripas paralelas, com a presença intermitente de partículas maiores de cementita. A dureza típica dessa microestrutura é de aproximadamente 40 - 45 HRc [4][5][11][11].

Bainita inferior: caracteriza-se pela configuração de cristais de ferrita que se assemelham a placas finas, contendo carbonetos de tamanho reduzido alinhados dentro das

próprias placas. A dureza típica dessa microestrutura geralmente situa-se na faixa de 50 - 60 HRc [4][5][11][11].

2. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho foi estruturada de forma a caracterizar as propriedades mecânicas da liga SAE 4150, processada com diferentes tratamentos térmicos, mantendo a dureza, isolando somente a variável de microestrutura na avaliação [8].

Para comparar os processos produtivos e as propriedades mecânicas resultantes dessas alterações, as variáveis de respostas serão a resistência à tração, alongamento e energia absorvida. Para obter esses resultados, é necessário a produção das seguintes amostras presentes na Tabela 1:

Tabela 1: Definição das variáveis dos testes práticos

	Quantidade de Corpos de prova	Parâmetro		Horas de produção
		Microestrutura alvo	Processo	
Teste 1	10	Martensítica	Têmpera	14
Teste 2	10	Bainítica	Austêmpera	14
Teste 3	10	Conforme recebido	Sem tratamento	0

2.1. Produção das amostras

2.1.1. Tipos de processos térmicos

Tratamentos térmicos são cruciais para a alteração das propriedades de metais e ligas, submetendo-os a ciclos controlados de aquecimento e resfriamento [5]. Neste estudo, os tratamentos térmicos realizados foram: têmpera, austêmpera e revenimento. O diagrama TTT para o aço SAE 4150 está apresentado na Figura 1.

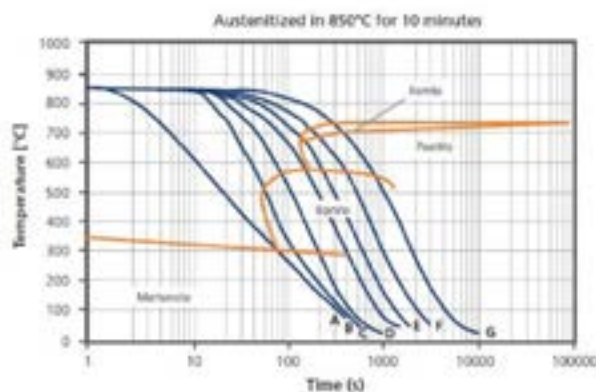


Figura 1: Curva TTT do material SAE 4150 [6]

Têmpera: A têmpera envolve o resfriamento rápido de um metal ou liga aquecida, imergindo-a em um meio de têmpera, como água, óleo ou ar, até esta atingir a temperatura ambiente. Para alcançar essa a microestrutura martensítica, a peça é submetida a uma taxa de extração de calor superior à da formação de bainita, ferrita ou perlita, conforme ilustrado na Figura 1, na curva A. Tratamentos de têmpera são comumente utilizados na indústria para elevar a dureza de componentes e a resistência ao desgaste [3][4][5][11]. Para a produção de amostras com microestrutura martensítica, neste trabalho foi utilizado Forno tipo batch automático. Esse forno possui sistema de aquecimento através de tubos radiantes alimentados por queimadores a gás natural. A atmosfera gasosa em contato com o material é formada pela injeção de metanol e nitrogênio resultando em aproximadamente 20% CO, 40% N₂ e 40% H₂. O óleo de resfriamento utilizado foi um óleo de martêmpera de base mineral e aditivos, com taxa de resfriamento máxima na faixa de 95 – 105 °C/s.

Os parâmetros de tempo e temperatura realizados estão demonstrados na Figura 2.

Austêmpera: É um processo específico de têmpera que envolve resfriamento controlado, permitindo que a temperatura se mantenha em níveis intermediários por determinados períodos. Isso visa reduzir a distorção do material causada por variações abruptas de temperatura. O resultado do processo de austêmpera é uma microestrutura

bainítica. Para que esse processo ocorra, é necessário submeter a peça a um patamar de temperatura intermediário, como demonstrado na Figura 1 pela curva B, C e D [4][5][11]. As amostras com microestrutura bainítica foram submetidas ao processo térmico típico de linha de banho de sal, na qual é formado por fornos do tipo poço a cadinho com sistema de aquecimento elétrico, os quais são divididos em três etapas: forno de pré-aquecimento, tipo poço com mufla, sem atmosfera controlada, com temperatura de operação em 400 °C; forno de austenitização a cadinho, banho formado por sais de metais alcalinos fundidos, composição a base de cloretos de sódio e potássio, com temperatura de operação: 840 °C; e por fim, forno de austêmpera a cadinho, banho formado por sais de metais alcalinos fundidos, composição à base de nitratos e nitritos de sódio e potássio, com temperatura de operação de 320 °C;

Os parâmetros de tempo e temperatura realizados estão demonstrados na Figura 3.

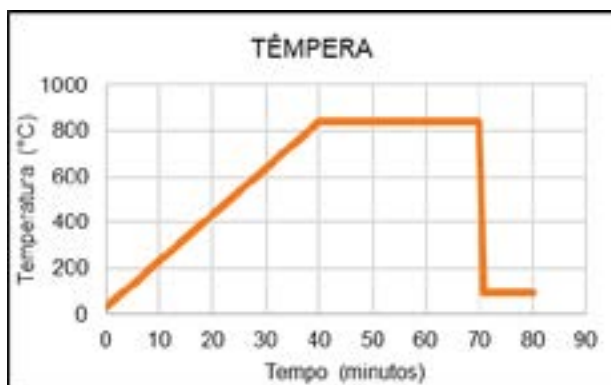


Figura 2: Parâmetros realizados no processo de têmpera em forno do tipo batch. Fonte: o autor.

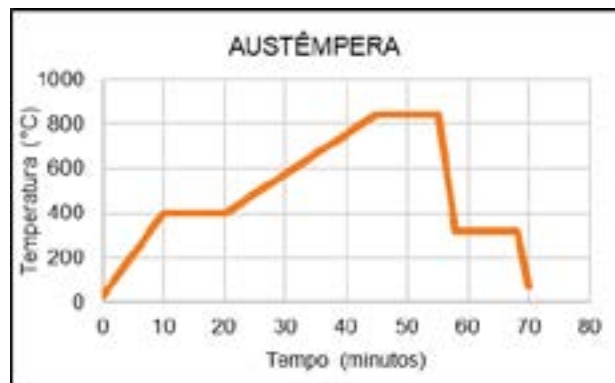


Figura 3: Parâmetros realizados no processo de austêmpera em linha de banho de sal fundido. Fonte: o autor.



insões causadas durante os processos térmicos. O a e, em seguida, resfriado [4][12]. Para a produção o mesmo equipamento e parâmetros para revenir ectivamente. O forno utilizado é do tipo carro, com as internos de ar. Os parâmetros de tempo e ura 4.

nsões causadas durante os processos térmicos. O a e, em seguida, resfriado [4][12]. Para a produção o mesmo equipamento e parâmetros para revenir ectivamente. O forno utilizado é do tipo carro, com as internos de ar. Os parâmetros de tempo e ura 4.

2.1.2. Caracterização das amostras

O aço utilizado nesse estudo foi SAE 4150, indicado para aplicações que necessitam da combinação de boa resistência mecânica e tenacidade. Seus principais elementos de liga são o cromo e molibdênio, que concedem ao aço um aumento de temperabilidade, resistência mecânica e a fadiga, conforme composição presente na Tabela 2.

Tabela 2: composição química esperada do aço SAE 4150 de acordo com ASTM A29. % em peso.

Figura 4: Parâmetros realizados no processo de revenimento. Fonte: o autor.

Aço	Elemento [%]						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
4150	0.48-0.53	0.15-0.35	0.75-1.00	≤ 0,035	≤ 0,040	0.80-1.10	0.15-0.25

2.1.3. Propriedades mecânicas

Para avaliar o desempenho das características mecânica, foram realizados ensaios de tração e tenacidade charpy. As normas ABNT NBR ISO 148-1:2013 e ABNT NBR ISO 6892-

1:2013 guiaram os ensaios, seguindo uma metodologia e condições comuns para todas as variáveis.

A avaliação das propriedades mecânicas de cada condição foi realizada de forma comparativa, visando obter os maiores valores para resistência a tração, alongamento e energia absorvida, conforme explanado no capítulo 2.5. *Definição das variáveis resposta.*

2.2. Ensaio mecânicos

A máquina utilizada no ensaio de tração foi uma MTS 370 Load Frame, equipada com uma célula de carga de 250 kN e um curso máximo de deslocamento de 100 mm. Foram realizadas, no mínimo, 10 amostras para cada variável estudada.

Para o ensaio de Tenacidade Charpy, a máquina foi um martelo de queda Heckert, com comprimento de 790 mm e uma massa de 19,962 kg. A escala de leitura máxima é 300 J. Foram utilizadas 5 amostras por variável.

2.3. Análises microscópicas

A análise microscópica das microestruturas em aços é crucial para compreender propriedades mecânicas, selecionar materiais, assegurar qualidade, além da possibilidade de otimizar processos de fabricação. Neste estudo, empregamos dois métodos usuais de análise: microscopia óptica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Para a análise de MO foi utilizado no estudo foi o Equipamento Leica DM4000 M LED. Com ampliações de 50x e 100x, tornou-se possível examinar e analisar as microestruturas resultantes em cada estágio dos tratamentos aos quais foram submetidas. Para as análises de MEV foi utilizado o aparelho JSM-6010LA da JEOL. Com ampliações de 2000x e 8000x, é possível examinar e analisar as microestruturas formadas em cada fase dos tratamentos aos quais foram submetidos.

2.5. Definição das variáveis resposta

Visando o entendimento do impacto da modificação do processo de tratamento térmico nas peças produzidas, as variáveis respostas desse projeto foram definidas visando o melhor cenário para peças submetidas a esforços externos, mitigando a possibilidade de falhas prematuras. A Tabela 3 apresenta as variáveis respostas que foram consideradas no projeto:

Tabela 3: Descrição das variáveis de resposta e respectivos alvos e especificações.

Variáveis de Resposta Quantitativa (número)	Tipo (maior, menor ou nominal)	Alvo (unidade)	Especificações		Imp. Rel (IR)
			Min (LIE)	Max (LSE)	
Y1: Limite de resistência à tração	Maior	Infinito	LIE	Infinito	12
Y2: Alongamento até a ruptura	Maior	Infinito	LIE	Infinito	12
Y3: Energia absorvida	Maior	Infinito	LIE	Infinito	5

2.5.1. Definição das variáveis resposta

Processos de tratamento térmico são complexos e sensíveis a mudanças. Para a análise dos fatores que podem impactar neste projeto, dividimos em três diferentes grupos:

1. Fatores de máquina: As amostras foram produzidas com 2 diferentes processos. Para cada processo distinto, as amostras foram produzidas em uma mesma batelada de teste, utilizando os mesmos parâmetros de processo, como taxas de aquecimento, tempos e atmosfera similares, homogeneizando a condição final das amostras.

2. Fatores ambientais: Para ambos os processos estudados, o tempo e local de armazenamento das peças antes do processo de revenimento foram minuciosamente selecionados, a fim de minimizar o potencial de promoção da oxidação superficial.

3. Fatores humanos: Em ambos os processos testados, a movimentação das cargas e dos parâmetros ocorre de forma automática, não dependendo de fatores humanos para que ocorra o processamento das peças. No entanto, a etapa de montagem de cargas ocorre manualmente. Para reduzir potenciais dispersões, essa etapa ocorreu por um mesmo operador para todo o lote de teste, bloqueando a mão de obra no estudo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos resultados foi realizada considerando dois grandes blocos: Resultados obtidos nos ensaios mecânicos e Resultados obtidos nas análises metalográficas.

3.1. Resultados obtidos nas análises metalográficas

3.1.1. Análise por microscopia óptica

A partir da análise por MO das amostras conforme recebido, verificou-se a presença de uma microestrutura lamelar acompanhada da ferrita pró-eutetóide, como observado na Figura 5, em (a) e (b). Para a microestrutura processada na austêmpera, identificada como bainítica inferior, distinguiu-se pela presença de agulhas de ferrita, apresentado na Figura 5 em (c), (d), (e) e (f), sendo está uma microestrutura obtida no intervalo entre 200 e 400 °C. Já a análise das amostras obtidas pelo processo de têmpera e revenimento, foi possível identificar uma microestrutura martensítica revenida apresentada na Figura 6, formada de agulhas individuais, exibindo uma subestrutura predominante de ripas.

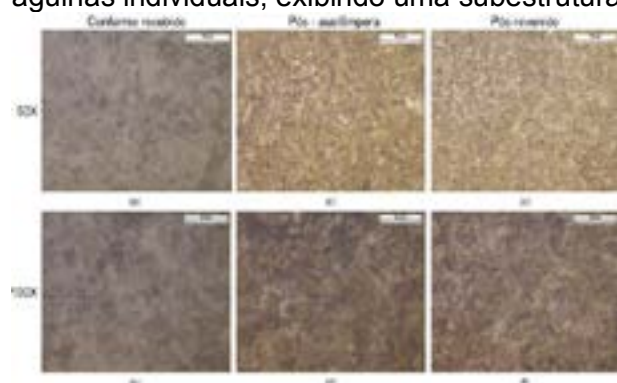


Figura 5: análise das microscópicas, onde (a) conforme recebido em 50x; (b) conforme recebido em 100x; (c) pós austêmpera em 50x; (d) pós austêmpera em 100x; (e) pós revenido em 50x; (f) pós revenido em 100x; Fonte: o autor.

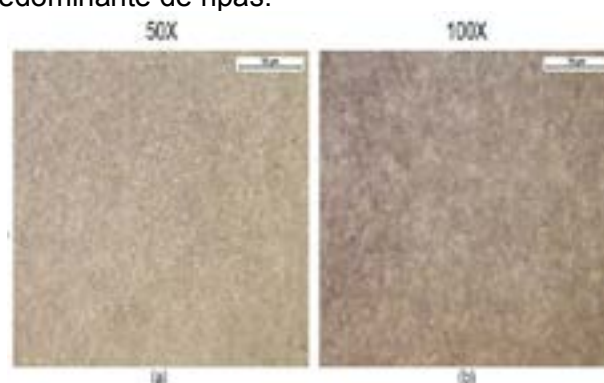


Figura 6: análise das microscópicas, onde (a) têmpera e revenimento em 50x; (b) têmpera e revenimento em 100x. Fonte: o autor.

3.1.2 Análise por microscopia eletrônica de varredura

A partir da análise das imagens adquiridas por MEV, é evidente a ocorrência de precipitados de cementita após os estágios de austêmpera e revenimento, conforme representado nas Figura 7- (c), (d), (e) e (f). Estas partículas, que são maiores em comparação com a martensita, se formam entre as ripas de ferrita.

Por outro lado, na martensita revenida, como ilustrado na Figura 8, os carbonetos apresentam dimensões menores e uma distribuição mais uniforme se comparados com os presentes na bainita. Esses carbonetos se desenvolvem durante o processo de revenimento, juntamente com outros compostos.

A presença dos carbonetos desempenha um papel crucial no aprimoramento da tenacidade do material, atuando de maneira eficaz como obstáculos contra a propagação de trincas. Além disso, devido à morfologia específica dos carbonetos na liga, ainda é possível assegurar que a dureza se mantenha nos parâmetros desejados, bem como a resistência mecânica seja preservada.

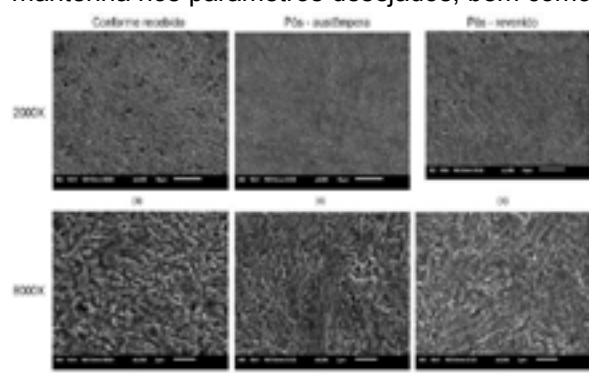


Figura 7: análise das microscópicas, onde (a) conforme recebido em 2000x; (b) conforme recebido em 8000x; (c) pós austêmpera em 2000x; (d) pós austêmpera em 8000x; (e) pós revenido em 2000x; (f) pós revenido em 8000x. Fonte: o autor.

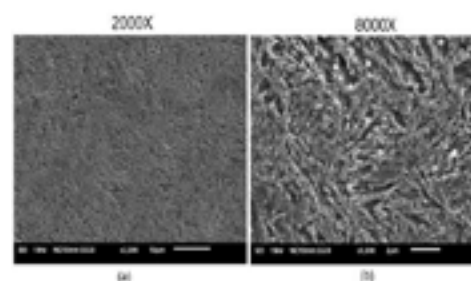


Figura 8: análise das microscópicas, onde (a) têmpera e revenimento em 2000x; (b) têmpera e revenimento em 8000x. Fonte: o autor.

3.2 Resultados obtidos nos ensaios mecânicos

Foi realizada a análise estatística dos ensaios para compreender o comportamento dos resultados, como apresentado na Figura 9.

Estatísticas				Estatísticas				Estatísticas						
Amostra	Tamanho da Amostra	Média	Desvio Padrão	IC de 95% Individual para a Média	Amostra	Tamanho da Amostra	Média	Desvio Padrão	IC de 95% Individual para a Média	Amostra	Tamanho da Amostra	Média	Desvio Padrão	IC de 95% Individual para a Média
CR	12	755,61	1,4791	(754,32; 756,90)	12	0,14919	0,00473	(0,14857; 0,15181)	5	22,2	1,3030	(0,581; 23,018)		
AT	12	1195,4	14,139	(1186,2; 1204,7)	12	0,06640	0,00497	(0,06320; 0,06959)	5	9,2	0,44721	(0,4467; 0,7033)		
AR	12	1291,2	22,150	(1271,7; 1310,7)	12	0,07709	0,00423	(0,07439; 0,07979)	5	14,6	0,54772	(11,820; 15,280)		
MR	12	1348,1	8,7070	(1341,6; 1354,7)	12	0,06968	0,00317	(0,06790; 0,07146)	5	21,6	0,54772	(20,820; 22,280)		

Figura 9: Resultados estatísticos dos testes onde, (a) limite de resistência à tração; (b) alongamento; (c) energia absorvida; (CR) conforme recebido; (AT) austêmpera; (AR) austêmpera revenida; (MR) tempera revenida. Fonte: o autor.

Estatisticamente, verificou-se uma diferença significativa das amostras produzidas em todos os casos, considerando um nível de confiança de 95%, com $p < 0,001$, conforme ilustrado na Figura 10.



Figura 10: Resultados estatísticos de ANOVA com um fator onde, (a) limite de resistência à tração; (b) alongamento; (c) energia absorvida; (CR) conforme recebido; (AT) austêmpera; (AR) austêmpera revenida; (MR) tempera revenida. Fonte: o autor.

Em relação aos resultados obtidos, conforme explicado na Figura 11 podemos verificar que para aplicações que exigem elevados valores em limite de resistência a tração, os maiores resultados observados foram nas amostras de austêmpera, porém essa apresenta baixa energia absorvida devido a presença de uma microestrutura altamente tensionada pela ausência do revenimento. Na comparação das amostras com revenimento, os maiores valores de limite de resistência à tração foi para martensita revenida, com um aumento de 4% dessa propriedade em relação a austêmpera com revenimento, conforme Figura 12.

Em relação a aplicações que exigem alto alongamento, as amostras conforme recebida apresentam melhores valores, porém seu limite de resistência à tração é baixo devido as microestruturas presente nas amostras recebidas. Para as peças tratadas, a melhor condição desta propriedade foi para a austêmpera revenida, como apresentado Figura 9, onde houve um aumento de 10% em relação à amostra martensítica revenida. Porém, temos uma redução da energia absorvida e a tensão limite de resistência.

Quanto a energia absorvida, ocorreu uma redução de 32% da austêmpera com revenimento em relação à têmpera com revenimento, sendo este o maior valor evidenciado nos testes, como apresentado na Figura 9.

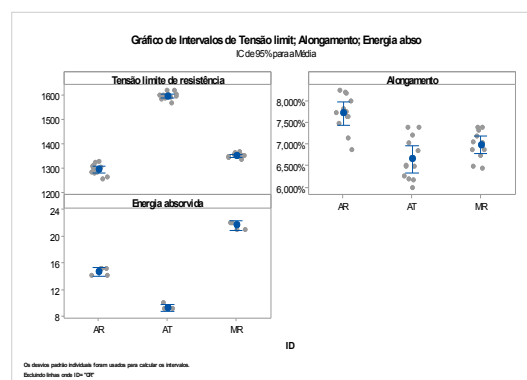
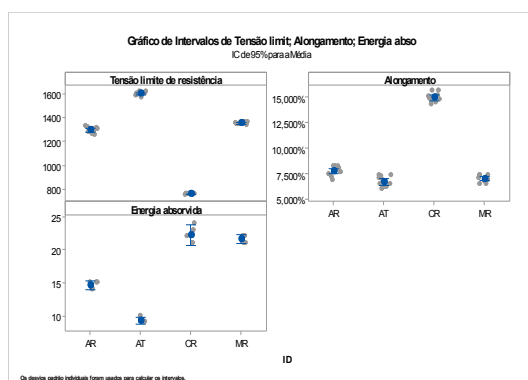


Figura 11: resultados dos gráficos de intervalos dos ensaios mecânicos, onde (CR) conforme recebido; (AT) austêmpera; (AR) austêmpera revenida; (MR) tempera revenida, sendo Tensão limite de resistência em Mpa, Alongamento em % e Energia absorvida em Joule. Fonte: o autor.

Figura 12: resultados dos gráficos de intervalos dos ensaios mecânicos, onde (AT) austêmpera; (AR) austêmpera revenida; (MR) tempera revenida, sendo Tensão limite de resistência em Mpa, Alongamento em % e Energia absorvida em Joule. Fonte: o autor.

4. CONCLUSÕES

Baseado nas análises metalográficas e análises estatísticas das propriedades mecânicas, pode-se obter as seguintes conclusões:

1. Foi possível evidenciar uma diferença significativa entre as amostras produzidas, com nível de confiança de 95%. Isso indica que as diferentes condições de tratamento térmico testadas tiveram impacto significativo nas propriedades mecânicas avaliadas.
2. Observou-se que o processo de austêmpera resultou em maiores valores de limite de resistência à tração, porém diminuiu a energia absorvida em razão da sua microestrutura altamente tensionada devido à ausência do revenimento. Entre as amostras com revenimento, a tempera incrementou em 4% desta propriedade em relação a austêmpera.
3. A amostra na condição conforme recebida apresentou os maiores valores de alongamento, porém com menor limite de resistência à tração dentre todas as variáveis. Para as amostras tratadas, a austêmpera revenida apresentou valores superiores a 10% em relação a tempera revenida, porém reduziu a energia absorvida e o limite de resistência à tração.
4. A tempera revenida teve um aumento de 32% da energia absorvida em relação a austêmpera revenida.
5. As amostras como recebidas revelaram a presença de uma microestrutura lamelar acompanhada de ferrita pró eutetóide. As amostras obtidas pelo processo de austêmpera apresentaram a microestrutura de bainita inferior, com agulhas de ferrita. Para as amostras obtidas pelo processo de tempera apresentaram uma microestrutura martensítica, caracterizada pela presença de agulhas individuais, além da presença de carbonetos com dimensões inferiores e distribuídos homogeneamente na matriz em relação a microestrutura bainítica.

Em resumo, os resultados expressam que diferentes condições de tratamento térmico têm influência direta nas propriedades mecânicas das amostras. A escolha do tratamento térmico deve ser realizada baseada nas necessidades específicas da aplicação. Cada tratamento térmico apresenta vantagens e desvantagens, e a seleção adequada dependerá das características desejadas para o material a ser utilizado. Podemos verificar que o processo de austêmpera revenida pode ser substituído por processo de tempera com revenimento, pois está possui melhores resultados de limite de tensão de resistência e energia absorvida, para aplicações que necessitem de alongamento superior a 6,5%.

5. REFERÊNCIAS

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 6892-1:2013. Materiais metálicos – Ensaio de tração;
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 148-1:2013. Materiais metálicos – Ensaio de impacto por pêndulo Charpy.
- [3] COSTA E SILVA; A. ROBERTO MEI, P. Aços e ligas especiais; 4ª Edição, São Paulo; Editora Edgard Blucher Ltda; 2021.
- [4] EDUARDO PINEDO, CARLOS. Tratamento térmicos e superficiais dos aços. 1ª Ed. São Paulo, Editora Edgard Blucher Ltda., 2021.
- [5] Heat treating of irons and steels, vol. 4D, ASM International, 2014.
- [6] <https://steelselector.sij.si/steels/VCMO150>. Acesso em 25/08/2023 às 11:36.
- [7] Mechanical testing and evaluation, vol. 8, ASM International, 2000.
- [8] OVAKO, Material data steel grade, última revisão em 18 janeiro de 2023.
- [9] Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys; vol. 1. ASM International, 1990, 126 – 139.
- [10] RANIERI, A. Efeitos das microestruturas bainíticas e multifásicas nas propriedades mecânicas do aço AISI 4340. Tese de mestrado em engenharia mecânica – Faculdade de engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá. 2005.

[11] Steel heat treating fundamentals and processes, vol. 4A, ASM International, 2013.

[12] Steel heat treating technologies, vol. 4B, ASM International, 201.



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil
26th International Forging Conference

**25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de
Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG**

*25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming
Conference / 9th BrDDRG Congress*

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

INVESTIGAÇÃO DO PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA COM FUSÃO DE AÇO BAIXA LIGA ATRAVÉS DO PROCESSO TANDEM

ALINE CIPRIANO¹

DENIS KHOLER

DAGOSTIM²

JOVANI CASTELAN³

ANDERSON DALEFFE⁴

CÉLIA DE

FRAGAMALFATTI⁵

RESUMO

O objetivo desta investigação científica foi implementar uma metodologia de Manufatura Aditiva para a utilização do processo GMAW duplo arame adaptado e integrado a tecnologia TANDEM em uma mesma poça de fusão. O trajeto foi conduzido alinhando-se os conhecimentos teóricos a prática experimental tendo como norte a otimização de processos com o uso da tecnologia, a fim de oportunizar processos mais eficientes e econômicos. O processo GMAW permite a união de metais de boa qualidade e, com a utilização de dois arames, é possível aumentar significativamente a taxa de deposição. No entanto, a utilização de dois arames necessita de maior transformação de energia, mesmo sendo um processo com menor tempo de deposição. Diante do exposto, torna-se fundamental realizar uma investigação científica com análise comparativa entre os corpos de prova obtidos por meio da deposição de materiais com arames iguais, a fim de verificar os efeitos dessa transformação de energia térmica em função do aumento do fluxo de elétrons. Inicialmente foi definido os parâmetros de trabalho dos equipamentos envolvidos, na sequência os corpos de prova provenientes do processo de deposição de mesmo material foram obtidos. Os corpos de prova foram submetidos a ensaios metalográficos para a caracterização microestrutural, ensaios mecânicos de dureza e perfil de dureza, e estudo da zona termicamente afetada – ZTA entre as camadas de deposição. Os resultados foram promissores, onde obteve-se boa homogeneidade em tamanho de grãos para análise metalográfica. Já para ensaio de microdureza Vickers, manteve-se um valor de 236 HV e 233 HV com 13 e 22,5 de desvio padrão, respectivamente.

Palavras-chave: Manufatura aditiva. Fusão localizada. Metalografia. Dureza Vickers.

(1) Doutoranda, Prof. Me.; UNISATC, Criciúma, SC., Brasil, aline.cipriano@satc.edu.br

(2) Mestrando, Eng. Metalúrgica, UNISATC, SC., Brasil, denisdagostim@gmail.com

(3) Prof. Dr.; UNISATC, Criciúma, SC., Brasil, jovani.castelan@satc.edu.br

(4) Prof. Dr.; UNISATC, Criciúma, SC., Brasil, anderson.daleffe@satc.edu.br

(5) Prof. Dra., UFRGS. RS. Brasil. materiaisxenergia@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

É cada vez mais evidente que os processos industriais metalúrgicos tradicionais precisam passar por ajustes, a fim de garantir a competitividade no mundo do trabalho com suas tecnologias. No Brasil, a indústria metalmeccânica apresenta grande importância no cenário econômico, com ampla aplicabilidade dos segmentos de transformação das matérias-primas, ou seja, os metais e demais produtos, por meio de técnicas de obtenção, fundição, fabricação e tratamento das ligas metálicas. Dessa forma, os processos de fabricação contribuem de maneira substancial para a solidificação de atividades importantes para o país, como a indústria naval, automobilística, mineração entre outros. Dentre os processos de fabricação, pode-se destacar a manufatura aditiva com sua produção de pequenas peças em condições que alinham otimização e qualidade.

Partindo da importância da metalurgia no contexto social e da premissa de que um produto final tem que passar pelo range de qualidade, as indústrias visam melhorias para as metodologias, a fim de melhorar os processos, mantendo como limite inferior a boa qualidade do produto, aliada a trajetória da investigação científica usada para estabelecer a relação da teoria com a prática.

Diante do exposto, o objetivo da pesquisa é promover a investigação científica com análise comparativa entre os corpos de prova obtidos por meio do processo GMAW duplo arame adaptado integrado a tecnologia TANDEM com seus mecanismos isolados de tochas e fontes, a fim de verificar os efeitos dessa transformação de energia que ocorre com dissipação de calor em função do aumento do fluxo de elétrons. Inicialmente foram fixados os parâmetros de trabalho dos equipamentos envolvidos, na sequência, foram obtidos os corpos de prova provenientes dos dois eletrodos de mesmo material constituídos por arames AWS A5.28 HL 85 MC-B de 1,2 mm de diâmetro, e utilizando-se como gás 75 % de argônio e 25% de dióxido de carbono. Posteriormente, os corpos de prova foram submetidos a ensaios metalográficos para a caracterização microestrutural, ensaios mecânicos de dureza e perfil de dureza, e estudo da zona termicamente afetada – ZTA entre as camadas de deposição para posterior discussão dos resultados e aplicabilidade com eficiência.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Manufatura Aditiva e sua interação com soldagem GMAW

A manufatura aditiva é um processo de fabricação recente que vem crescendo gradativamente. Notoriamente, sua capacidade de produzir pequenos objetos ou parte destes, melhora a funcionalidade do processo, como a redução de tempo na fabricação das peças, redução de massa, velocidade e precisão de deposição, elevada densidade de energia, sendo aplicada inclusive na industrial aeroespacial [1]. De acordo com a ASTM (American Society for Testing And Materials), os sinônimos de manufatura aditiva são, fabricação aditiva, técnicas aditivas, processo aditivo, manufatura por camada ou de fabricação de forma livre (Freeform) ou manufatura por camada.

Contudo, outro processo que merece destaque nesse nicho é a deposição de metais GMAW- TANDEM (duplo arame). O método Soldagem a arco gás metal (GMAW) permite a obtenção de soldas de boa qualidade e pode ser efetuado usando vários arames, aumentando a exigência do controle de transformação de energia que ocorre com a dissipação de calor em função do aumento do fluxo de elétrons. A poça de fusão obtida chama a atenção pela interação de fenômenos químicos e físicos que modificam significativamente a natureza do material a ser depositado [2].

Neste processo, os parâmetros de soldagem orientam o processo com maiores solicitações de energia e conseqüentemente maior quantidade de calor depositado no material. O processo GMAW duplo arame integrado a tecnologia TANDEM, foi desenvolvido para potencializar grandezas como a taxa de velocidade e a deposição do material na trajetória que descreve o cordão por manufatura aditiva.

2.2 Diferença entre a orientação dos eletrodos Twin arc e TANDEM arc

A disposição dos eletrodos deve ser feita levando em consideração os diferentes tipos oferecidos pelos fabricantes. Existem inúmeros tipos de eletrodos com seus diferentes modos de adição, como eletrodo

no dado instante de sua aplicabilidade. Neste campo de estudos sobre Ligas Metálicas, o aço é o material mais proeminente no mundo. Devido a sua excelente combinação de propriedades mecânicas, elétricas e químicas que resulta em um significativo custo competitivo [7].

A dureza pode ser definida como resistência a penetração de um material duro no outro [8]. Dentre os principais métodos de ensaio de dureza amplamente utilizados, destaca-se a dureza vickers, que apresenta como vantagens a compatibilidade com todos os tipos de metais, sendo que seu valor de dureza consiste no quociente da carga aplicada pela área de impressão deixada no corpo ensaiado [9].

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A investigação científica foi implementada nos laboratórios de Manufatura Aditiva do Centro Universitário Unisatc. Para o desenvolvimento da pesquisa, segue abaixo a sequência didática de experimentação.

3.1. Processo de Manufatura Aditiva duplo arame integrado adaptado da tecnologia TANDEM

Para a realização do experimento foi utilizado simultaneamente uma máquina de soldagem modelo SMASHWELD 250E semiautomática, da marca ESAB e outra máquina modelo VI 320, da marca White Martins, conforme ilustra figura 2 .



Figura 2: Máquinas de Soldagem a Arco. Elaborado pelo autor, 2023.

O conhecimento das propriedades dos materiais a ser utilizado, portanto é indispensável para que o fluxo do processamento ocorra de modo assertivo. A composição química do arame utilizado se encontra na tabela 1.

Tabela 1: Composição química arame HL 85 MC-B [6]

Componente	Valor (%)
Carbono (C)	0,07
Silício (Si)	0,4
Manganês (Mn)	1,4
Cromo (Cr)	0,5
Níquel (Ni)	2,2
Molibdênio (Mo)	0,4

A figura 3, representa as tochas, (bico de deposição), 1 e 2, alinhadas transversalmente em 60°, responsáveis pela deposição em camadas. Vale destacar que, o movimento das tochas pode ser controlado por uma rotina de programação CNC em três dimensões.



Figura 3: Tochas alinhadas de acordo com o ângulo. Elaborado pelo autor, 2023.

3.2. DEPOSIÇÃO ARAME HL 85 MC-BB

No ensaio preliminar foi feito um estudo prático para ajustar a taxa de deposição de cada máquina de soldagem, fazendo com que cada máquina depositasse a mesma quantidade, ou a quantidade mais equilibrada de eletrodo durante o processo, conforme dados na tabela 2.

Tabela 2: Balanço de massa dos eletrodos

Equipamento	Antes (g)	Depois (g)	Valor (%)
ESAB (tocha 1)	315	333	51
White Martins (tocha 2)	317	334	49

Após o ajuste da tocha de deposição, cordões foram impressos com controle de passo (altura de deposição), assim, chegou-se a valores de aproximadamente 35 mm de altura, 16 mm de largura e 200 mm de comprimento, com um total de 15 passos aplicados.

No ensaio mecânico realizado utilizou-se de dois arames de aço com alta resistência, baixa-liga AWS A5.28 HL 85 MC-B para a deposição sobre o metal base e posterior fabricação dos corpos de prova. A figura 5 demarca a trajetória com a sequência do procedimento: metal base (a), cordão de fusão localizada na perspectiva vertical (b), cordão de fusão localizada na perspectiva oblíqua (c) e conjunto cordão+metal base (d).

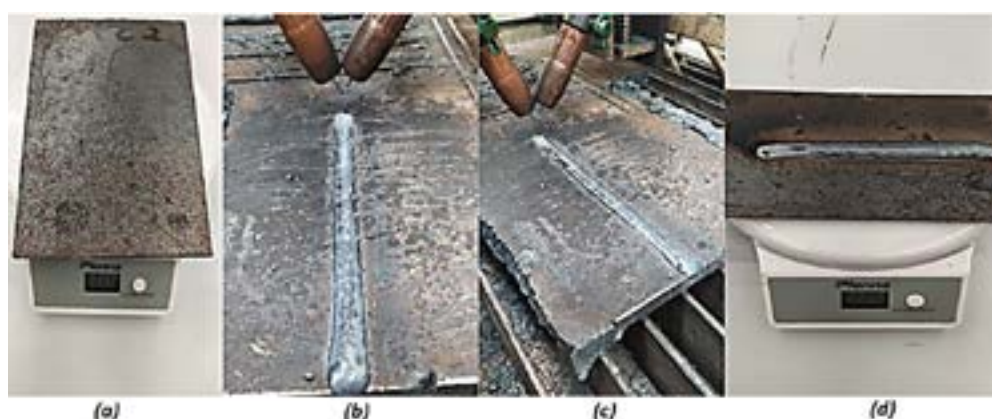


Figura 4: Sequência do procedimento de obtenção do cordão. Elaborado pelo autor, 2023.

3.3 PARÂMETROS UTILIZADOS

Os parâmetros de referência de cada máquina de solda, estão descritos na figura 5. O método por curto-circuito foi utilizado para a transferência do metal, cuja a tensão máxima indicada é de 22V e a velocidade de alimentação do arame menor de 3,2 m/min.

Parâmetros	Valores	Parâmetros	Valores
Tensão (V)	20	Tensão (V)	22
Corrente (A)	195	Corrente (A)	90
Velocidade alimentação do arame (m/min)	7,1	Velocidade alimentação do arame (m/min)	3,2
Vazão gás de proteção (l/min)	14	Vazão gás de proteção (l/min)	14
Taxa de deposição (Kg/h)	2.5	Taxa de deposição (Kg/h)	1.15

Figura 5: Parâmetros de referência Esab e White Martins. Elaborado pelo autor, 2023.

3.4 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

No ensaio mecânico realizado, utilizou-se um microdurômetro modelo HMV-2TADW da marca SHIMADZE® seguindo a norma ABNT NBR ISO 6507. O ensaio foi realizado em dois corpos de prova aplicando uma força de 9,807 N na longitudinal, e uma distância de 1mm a cada edentação, com um total de 18 edentações por amostra.

3.5 ANÁLISE METALOGRAFICA

O ensaio metalográfico foi realizado seguindo a norma ABNT NBR 15454, que define os termos empregados em metalografia das ligas ferro-carbono, utilizando um microscópio Olympus modelo SC30.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O tratamento de dados de acordo com os resultados obtidos serão descritos na sequência, cujo o propósito da investigação científica foi validar um processo de fabricação inovador MADA por meio do método GMAW duplo arame adaptado em uma única poça de fusão.

4.1 Caracterização dos Cordões

Foi obtida uma parede por meio da deposição por fusão localizada, em um total de 15 passes. Nesse sentido, observa-se o aspecto homogêneo e uniforme proveniente da deposição satisfatória, conforme figura 6.



Figura 6: Parede em camadas proveniente da deposição. Elaborado pelo autor, 2023.

4.2 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

Nesta etapa do trabalho, é apresentado os resultados de microdureza Vickers para os corpos de prova obtidos. Os resultados alcançados ao longo do perfil do corpo de prova 1 e 2, CP1 e CP2, respectivamente, são apresentados na figura 7.

Dessa forma, para o CP1 obteve-se uma média de aproximadamente 236 HV e 233 HV para o CP2, com desvio padrão de 10,35 e 22,46, respectivamente. Assim sendo, nota-se boa homogeneidade entre as amostras ensaiadas bem como baixo desvio padrão, que assim, garante um resultado com maior precisão.

Nota-se também, que para o corpo de prova CP2, há para a primeira indentação um salto em dureza chegando em 289 HV. Isso se dá ao fato de que para a primeira indentação, ou seja, o primeiro cordão ensaiado é o último cordão depositado. Sendo assim, este, não sofreu reaquecimento comparado aos outros cordões depositados, bem como obteve uma troca de calor com o ambiente atmosférico que se faz uso de temperaturas baixas, e assim podendo sofrer um tratamento térmico nessa região, explicando assim a diferença de dureza.

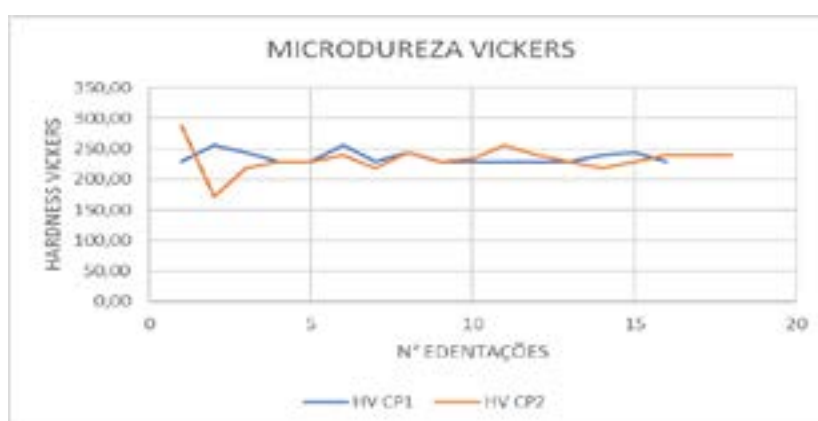


Figura 7: Dados de microdureza Vickers. Elaborado pelo autor, 2023.

4.3 – ANÁLISE METALGRÁFICA

A análise metalográfica que é empregada principalmente para avaliar a microestrutura do material, foi realizada, onde pode-se constatar que o material apresenta grãos com homogeneidade e característicos de um aço SAE médio carbono. A figura 8 detalha a microestrutura do arame HL 85 MC-B com aumento de 200 e 500 vezes. Para melhor compreender a figura 8, foi desenvolvido abreviaturas, tais como: IC: Inclusão; PL: Perlita; FE: Ferrita equiaxiais, FC: agregados de ferrita e carbonetos.

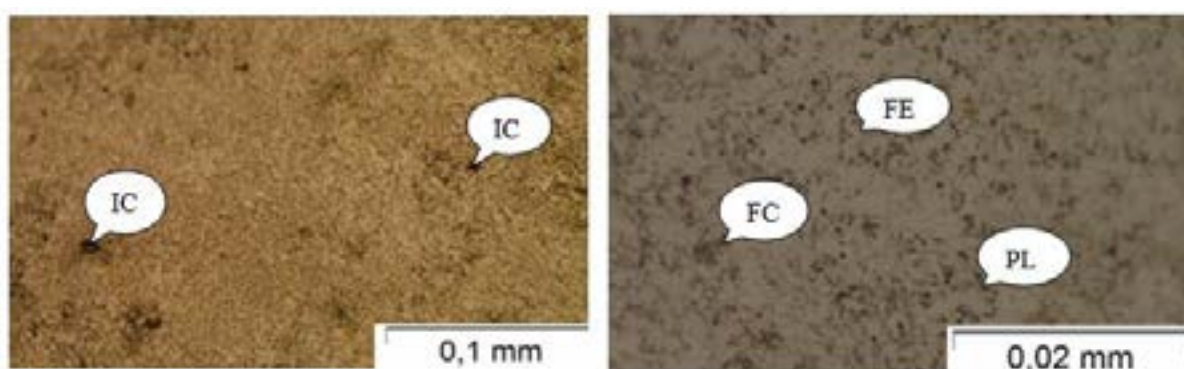


Figura 8: Metalografia CP1. Elaborado pelo autor, 2023.

5 CONCLUSÕES

Partindo do implemento de uma metodologia de Manufatura Aditiva para a utilização do processo GMAW duplo arame adaptado e integrado a tecnologia TANDEM em uma mesma poça de fusão, conclui-se que os resultados foram satisfatórios por apresentarem caráter unificado, e uniformidade entre os cordões, contribuindo com propriedades como a homogeneidade, conforme comprovado no ensaio de micro dureza Vickers.

Em se tratando de ensaios mecânicos, o arame utilizado AWS A5.28 HL 85 MC-B apresentou uma dureza média de 236 HV e 233 HV, ou seja, 38% maior que o aço carbono SAE 1045. Nesse sentido, a comparação percentual pode ser explicada pela presença dos elementos químicos como o manganês (Mn) em concentração maior, e o silício (Si), bem como cromo (Cr) e Níquel (Ni).

Já para análise metalográfica, a microestrutura se mostrou homogênea e com baixo tamanho de grãos, explicando assim a dureza do metal ficar próximo de um aço médio carbono 1045. A microestrutura, apresentou ferrita equiaxiais provenientes da zona austenítica e o microconstituente perlita que é o responsável por endurecer o metal.

6 REFERÊNCIAS

- [1] STEEN, W.M.; MAZUNDER, J. Laser Material Processing. 4. Ed. Berlin: Springer-Verlag Ltda, 2010.
- [2] OLIVEIRA, R.P. A influência do reaquecimento de camadas na microestrutura e na dureza de produtos de aço fabricados com manufatura aditiva por deposição a arco (MADA), comparando dois tipos de resfriamento: a ar e a água. Diss. de Mestrado. Mestrado Profissional em Engenharia da Produção, UFAM, 2022.
- [3] Ferrari M, Das Neves MDM, Panão JN. Análise das propriedades mecânicas de juntas de aço carbono estrutural soldadas pelo processo arco submerso com os arcos simples e duplo (Tandem-Arc). Soldagem e Inspeção. 2019;24:e2402. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si2304.07> » <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si2304.07>
- [4] TEIXEIRA, Gustavo Simões. Análise da influência dos parâmetros de soldagem sobre a geometria do cordão de solda depositado pelo processo de soldagem TIG – MAG em tandem. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011. Disponível em <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/32025>> . Acesso em: 10 de ago de 2023.
- [5] VOIGT AL, Cunha TV, Niño CE. Influência do posicionamento da tocha de soldagem sobre a geometria e sanidade do cordão de solda produzido com o processo GMAW convencional em elevadas velocidades de soldagem. Soldagem & Inspeção, 2020. Disponível em < <https://www.scielo.br/j/si/a/9FXpvrjdbqJttPV7d8zrGh/?lang=pt>> . Acesso em: 03 de set de 2023.
- [6] GROETELAARS, P.J. Influência da variação de parâmetros de soldagem sobre a transferência metálica e perfil do cordão no processo MIG/MAG duplo-aramé. Diss. de Mestrado. Mestrado em Engenharia Mecânica, UFU, 2005.
- [7] MANHÃES, William Sfalzin; SILVA, Luiz Rafael Resende; ZANCANELLA, Antônio Carlos Barbosa; CASTRO, Bruno Dorneles; MAZIERO, Rômulo; RUBIO, Juan Carlos Campos. **Caracterização metalográfica e mecânica do aço ABNT/SAE 1020 submetido ao tratamento termoquímico de cementação e ao tratamento térmico de têmpera.** Revista Matéria, v.27, n.2. Rio de Janeiro, 2022.
- [8] Ensaio de Dureza: Dureza Brinell. LabTeste Laboratório Metalúrgico, Santa Bárbara d'Oeste, 2023.
- [9] O que é Dureza Vickers? Rijeza Metalurgia, São Leopoldo, 2023.
- [10] LUZ, G. Aço SAE 1020 Propriedades (e Fornecedores do Aço 1020). Blog Materiais, 2017.
- [11] Catálogo de Arames de Aço Carbono. Tenax, Rio de Janeiro, 2023.



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil
26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

FABRICAÇÃO DE PEÇAS METÁLICAS POR MANUFATURA ADITIVA COM DIFERENTES CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS SUPERFICIAIS

Henrique Cechinel Casagrande ⁽¹⁾

Anderson Daleffe ⁽²⁾

Daniel Fritzen ⁽³⁾

Gilson de March ⁽⁴⁾

Lirio Schaeffer ⁽⁵⁾

RESUMO

Em decorrência dos avanços tecnológicos constantes no ramo metalúrgico, e buscando contribuir para tal, o estudo é aplicado a um dos pilares da indústria 4.0, sendo este, a manufatura aditiva. Busca-se, imprimir peças com diferentes características superficiais, onde, após a fabricação não venha ser necessário utilizar tratamentos térmicos e tratamentos superficiais. Dessa forma, amostras foram impressas, com metal de base maleável utilizando-se o arame de soldadura AWS A5.18 ER70S 6. Já para a região da superfície, utilizou-se o arame AWS A5.28 HL 85 MC-B, arame para soldagem de aços baixa liga e alta resistência mecânica. Ressalta-se o uso da técnica de soldagem TANDEM como aliada na deposição dos materiais, visto que se utilizam dois materiais de diferentes características. Para determinar os resultados, foram impressas duas paredes de 200 mm de comprimento e aproximadamente 35 mm de altura, que posteriormente foram cortadas três amostras para análise metalográfica e ensaio de microdureza Vickers. Os resultados se mostraram eminentes, sendo que para o material com arame AWS A5.18 ER70S 6 a dureza ficou entre 194 à 210 HV, e para o material AWS A5.28 HL 85 MC-B a dureza ficou com valores entre 262 à 277, podendo este valor chegar em aproximadamente 356 HV ao se tratar da última camada depositada, onde ocorre troca térmica com ambiente sem reaquecimento, diferente dos demais cordões depositados que são reaquecidos a cada camada impressa.

Palavras-chave — Fusão localizada, processo de soldagem Tandem, arame de soldagem ER70S 6, arame de soldagem HL 85 MC-B, manufatura aditiva.

⁽¹⁾ Mestrando, Eng. Metalúrgica UNISATC, SC., Brasil. henrique_cechinel@hotmail.com

⁽²⁾ Prof. Dr.; UNISATC, Criciúma, SC., Brasil, anderson.daleffe@satc.edu.br

⁽³⁾ Prof. Dr., Centro Universitário UNISACT, SC., Brasil. daniel.fritzen@satc.edu.br

⁽⁴⁾ Mestrando, Eng. Metalúrgica, UNISATC, SC., Brasil. gilson.march@satc.edu.br

⁽⁵⁾ Prof. Dr., UFRGS. RS. Brasil. schaefer@ufrgs.br

1. INTRODUÇÃO

O processo de manufatura aditiva por arco de arame, Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM), consiste na deposição de material camada por camada [1].

O processo de manufatura aditiva é uma combinação de material de soldagem a arco e de matéria-prima. Esse método vem sendo utilizado no processo de soldagem a arco de metal a gás (GMAW), também pode ser usado na soldagem a arco de tungstênio a gás (GTAW) ou até mesmo na soldagem a arco por plasma (PAW) [2].

Dos desafios existentes dentro do processo de manufatura aditiva por arco de arame, o mais desafiador é desenvolver ou produzir peças livres de defeitos e com boas condições físicas, mecânicas e propriedades metalúrgicas, atendendo as exigências da engenharia [3].

Para facilitar o processo de fabricação das amostras, visto que para cada tipo de material aplicado neste trabalho é necessário parâmetros de soldagens diferentes, utiliza-se o processo de soldagem TANDEM, que segundo a norma AWS D1.1/D1.1M:2020, o termo TANDEM, é referente a posição geométrica dos eletrodos, onde a linha entre os arcos elétricos é paralela à direção de soldagem. Aplica-se este método quando há necessidade de grande produção, ou, para quando há necessidade de deposição de diferentes materiais. O processo TANDEM trabalha com uma fonte de energia separada para cada tocha de deposição [4].

Neste contexto, busca-se através do processo de manufatura aditiva juntamente com o processo de soldagem TANDEM, desenvolver peças com diferentes características superficiais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo é concentrado na fabricação/impressão de peças por manufatura aditiva por arco de arame, onde estuda-se dois arames de soldagem: AWS A5.18 ER70S 6 e AWS A5.28 HL 85 MC-B.

O equipamento utilizado é uma junção entre o processo de manufatura aditiva por fusão localizada e o processo de soldagem TANDEM. A Figura 1, traz o equipamento utilizado para fabricação das amostras.

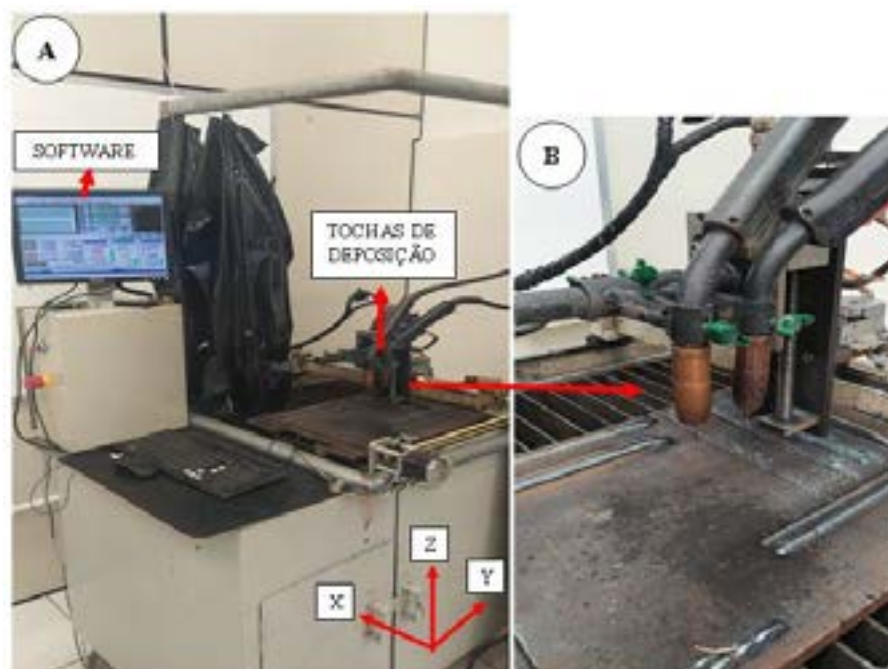


Figura 1: Equipamento para fabricação das amostras. Do autor, 2023.

A Figura 1-A, traz a máquina de manufatura aditiva, essa, por sua vez, é composta por um Software denominado MACH 3. Este possui programação CNC (Centro Numérico Computadorizado), responsável para o desenvolvimento da programação para deposição de metal, sendo essas coordenadas em três eixos (X, Y e Z). Em destaque na Figura 1-B, estão duas tochas para deposição. Foi adotado essa técnica de duas tochas (TANDEM), para melhor desenvolver as peças para os

ensaios mecânicos, visto que foi utilizado dois metais de diferentes características e que necessitam de parâmetros de soldagem diferentes, facilitando assim a produção das amostras.

2.1 ARAME ER70S 6

ER70S 6, é considerado um material para soldagem de uso geral, sendo um arame de extremo controle de cordão e microestrutura, onde este, possui baixa resistência a elevadas temperaturas e a ambientes agressivos [5].

Como citado anteriormente, utilizou-se como material de soldagem de baixa resistência mecânica o arame do fabricante ESAB ER70S 6, sendo este fornecido em bobinas de 15 kg. Para este estudo, utilizou-se os diâmetros de 1,2 e 1 mm. A composição química deste material é melhor compreendida na Tabela 1 logo abaixo. A norma para este arame é a AWS A5.18.

Tabela 1: Composição química arame ER70S 6 [5]

Componente	Valor (%)
Carbono (C)	0,07
Silício (Si)	0,90
Manganês (Mn)	1,50
Enxofre (S)	0,010
Fósforo (P)	0,013

2.2 ARAME HL 85 MC-B

O material HL 85 MC-B é um arame tubular, utilizado em soldagem de aços baixa liga e de alta resistência mecânica. É utilizado para soldadura de metais tais como AISI 4130, 4140, 8640 bem como outros. Normalmente, utiliza-se como gás de proteção argônio (Ar) + Dióxido de carbono (CO₂) [6]. A norma para este arame é a AWS A5.28. Este material é fornecido pelo fabricante BÖHLER em bobinas de 15 kg.

Tabela 2: Composição química arame HL 85 MC-B [6]

Componente	Valor (%)
Carbono (C)	0,07
Silício (Si)	0,4
Manganês (Mn)	1,4
Cromo (Cr)	0,5
Níquel (Ni)	2,2
Molibdênio (Mo)	0,4

2.3 FABRICAÇÃO DAS AMOSTRAS

Utilizando-se a máquina de manufatura aditiva, foram realizados a impressão de dois corpos de prova com 200 milímetros de comprimento. A Figura 2 exemplifica a metodologia utilizada. Na imagem destacada como “A”, foi realizado a impressão de dois cordões com o mesmo material, sendo estes o arame AWS A5.18 ER70S 6, o objetivo é avaliar a união dos cordões em sentido transversal a direção depositada. Na imagem destacado como “B”, foi depositado o material AWS A5.18 ER70S 6 e o material HL 85 MC-B, este por sua vez, será avaliado a união entre os cordões depositados bem como a microestrutura na união entre os dois materiais.

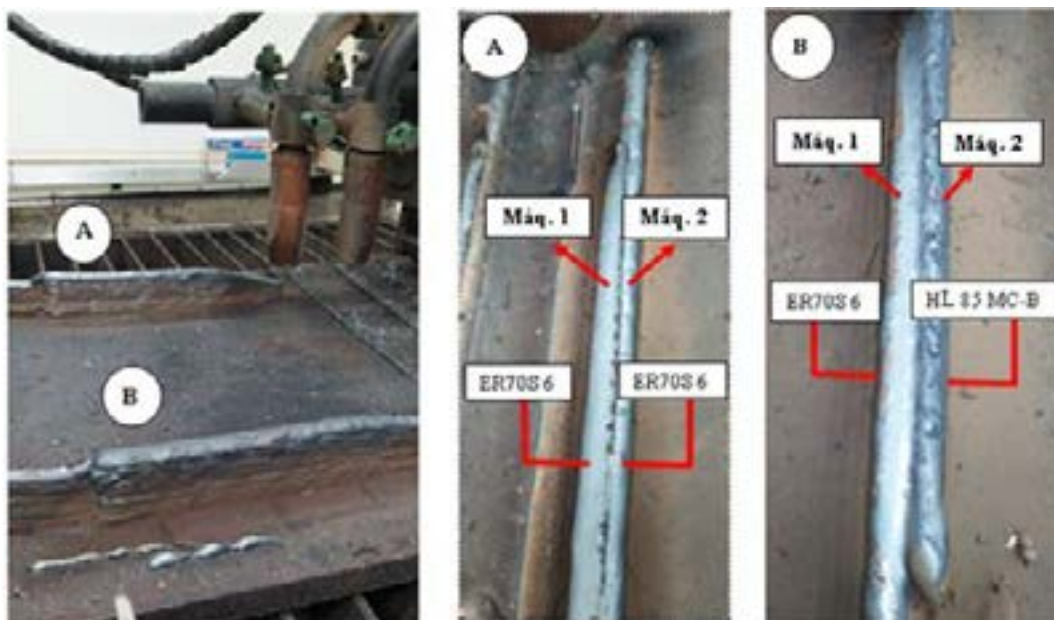


Figura 2: Produção das amostras para ensaios mecânicos. Do autor, 2023.

Na sequência, as Tabelas 3 e 4 trazem os parâmetros utilizados para a fabricação das amostras. Afim de entender a quantidade de metal depositado por cada tocha, foi realizado uma amostragem pesando uma chapa antes e logo após a soldadura para cada material, e realizado o balanço de massa. Para a fabricação das amostras, foi utilizado uma máquina da ESAB modelo SMASHWELD 250E, e uma máquina da White Martins modelo VI 320. Todas as amostras foram impressas com gás ativo, sendo 75% de argônio e 25% de CO₂, e com velocidade de avanço do CNC em 400 mm/min. A Tabela 3 demonstra os parâmetros utilizados para fabricação das amostras somente com o material ER70S 6, bem como os resultados relacionados a manufatura aditiva, como por exemplo altura média para cada deposição, largura e quantidade de material depositado por máquina.

Tabela 3: ER70S 6 vs ER70S 6

Parâmetros	ESAB SMASHWELD	WHITE MARTINS
	Valores	Valores
Tensão (V):	19	18
Corrente (A):	120	100
Vazão gás (L/min):	10	10
Velocidade arame (m/min):	6	5,5
Diâmetro do arame (mm):	1	1
Quantidade de cordões:		12
Altura deposição (mm):		2,62
Largura deposição (mm):		11,49
Altura total (mm):		33,5
Quantidade de material depositado Máq. 1 ESAB (%):		53,68
Quantidade de material depositado Máq. 2 White M. (%):		46,32

Vale salientar que ao se referir como máquina 1, trata-se da máquina ESAB SMASHWELD 250E, e ao se mencionar máquina 2, é referente ao equipamento de soldagem White Martins VI 320.

A Tabela 4 é referente aos parâmetros do material ER70S 6 com o material HL 85 MC-B, nota-se um aumento no valor de corrente para o arame HL 85 MC-B. Este aumento é devido o tipo de material, ou seja, as características intrínsecas do arame, necessitando-se de um valor de corrente maior para derreter o consumível.

Tabela 4: ER70S 6 vs HL 85 MC-B

Parâmetros	Valores	
	ESAB SMASHWELD (ER70S 6)	WHITE MARTINS (HL 85 MC-B)
Tensão (V):	20	22
Corrente (A):	190	165
Vazão gás (L/min):	10	10
Velocidade arame (m/min):	6	5,5
Diâmetro do arame (mm):	1,2	1,2
Quantidade de cordões:		12
Altura deposição (mm):		2,58
Largura deposição (mm):		16,78
Altura total (mm):		33
Quantidade de material depositado Máq. 1 ESAB (%):		55,52
Quantidade de material depositado Máq. 2 White M. (%):		44,68

Após a impressão das amostras, essas foram cortadas em uma serra fita da fabricante Franho modelo FM 18S, e posteriormente retificadas em uma retífica plana Mello modelo P36, conforme Figura 3.



Figura 3: Preparação das amostras para análise de metalografia e dureza. Do autor, 2023.

2.4 ENSAIO DE METALOGRAFIA

Para analisar a estrutura das amostras foi realizado a preparação com três corpos de prova com reagente Nital 2 % com tempo de ataque 5 segundos. Na sequência foi realizado o ensaio no microscópio Olympus modelo SC30, conforme norma ABNT NBR 15454.

2.5 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

Para o ensaio de micro dureza Vickers utilizou-se o equipamento microdurômetro modelo HMV-2TADW da marca SHIMADZE®, seguindo a norma ABNT NBR ISO 6507, onde foi realizado indentações no sentido transversal e longitudinal ao sentido da deposição do metal, afim de analisar a dureza entre os cordões e os valores de dureza para os diferentes materiais, o estudo foi ao longo de um perfil, onde, realizou-se aproximadamente 20 penetrações no sentido longitudinal (sentido de maior comprimento) e aproximadamente 12 no sentido transversal, aplicando-se uma força de 4,903 N, e uma distância de 1,5 mm a cada penetração. Os resultados foram obtidos através da EQ.1.

$$HV = \frac{2F \operatorname{sen} (136^\circ/2)}{d^2} \cong 1,854 \frac{F}{d^2} \quad (1)$$

Hv: Hardness Vickers (HV);

F: Carga aplicada (Kg);

d²: Distância entre as diagonais (mm).

3 RESULTADOS

3.1 Micro dureza Vickers

A Tabela 5 demonstra os resultados obtidos através do ensaio de microdureza Vickers. Para a coluna descrita como longitudinal para o arame ER70S 6, os resultados ficaram entre 194,25 HV até 210,11 HV, com desvio padrão de até 26. Comparado com a literatura, o aço SAE 1020 possui uma média de 155 HV [7], já para um aço SAE 1045, dependendo seu processo de fabricação, tem-se um valor médio de 185 HV [8]. Percebe-se que para o arame ER70S 6, os valores de dureza ficaram um pouco acima comparado a um aço SAE 1045.

Tabela 5: Resultado microdureza Vickers

Amostras	Longitudinal ER70S 6	Longitudinal HL 85 MC-B
Amostra 1 Dureza média (HV):	209,62	262,53
Amostra 1 Desvio padrão:	26,13	28,57
Amostra 2 Dureza média (HV):	210,11	277,34
Amostra 2 Desvio padrão:	18,31	19,11
Amostra 3 Dureza média (HV):	194,25	263,39
Amostra 3 Desvio padrão:	15,84	8,34

A Figura 4 detalha a dureza em sentido transversal para as três amostras ensaiadas, ou seja, a primeira indentação se iniciou no material ER70S 6 e a última indentação foi realizada no material HL 85 MC-B. Os valores se iniciam em aproximadamente 162 HV e em seu ponto de maior dureza pode chegar à 356 HV. Novamente o material se iniciou com características de dureza entre um aço de baixo à médio teor de carbono. Já para a dureza a partir da décima indentação, é possível perceber o aumento crescente de até 356 HV, este valor fica próximo de um aço SAE 1045 temperado, de aproximadamente 360 HV [10].



Figura 4: Análise de microdureza Vickers na transversal com material ER70S 6 vs HL 85 MC-B

Para a Figura 5, demonstra-se os ensaios realizados nas amostras do arame ER70S 6 vs ER70S 6 em sentido longitudinal. A amostra de número dois foi desclassificada por uma falha na preparação da mesma. Analisando as amostras de número um e três, é possível perceber um aumento de dureza próximo as últimas indentações, isso ocorre devido ao fato de na parte final das impressões de material o último cordão não sofrer reaquecimento, pois ele nunca se torna um substrato como acontece com os cordões depositados anteriormente. Assim sendo, este cordão final se torna vulnerável a troca de calor com o ambiente externo, ocorrendo assim, um tratamento térmico e consequentemente um aumento de dureza nessa região, que ficou com aproximadamente 233 HV. Já o restante das amostras apresentou uma média de 192 HV e 11 de desvio padrão.



Figura 5: Dureza Vickers para as amostras do arame ER70S 6 vs ER70S 6 em sentido longitudinal. Do autor, 2023.

3.2 ENSAIO DE METALOGRAFIA

A Figura 6 traz à análise realizada na fronteira entre os arames ER70S 6 e HL 85 MC-B. De acordo com tal, onde, denominado com “A”, tem-se a metalografia com aumento de 50 vezes, percebe-se a diferença morfológica em relação ao tamanho dos grãos. Para a região onde está depositado o material ER70S 6, os grãos possuem uma geometria maior em comparação a região da deposição HL 85 MC-B. Para melhor compreender tal imagem, foi desenvolvido abreviaturas, tais como: IC: Inclusão; PL: Perlita; FE: Ferrita equiaxiais, FC: agregados de ferrita e carbonetos.

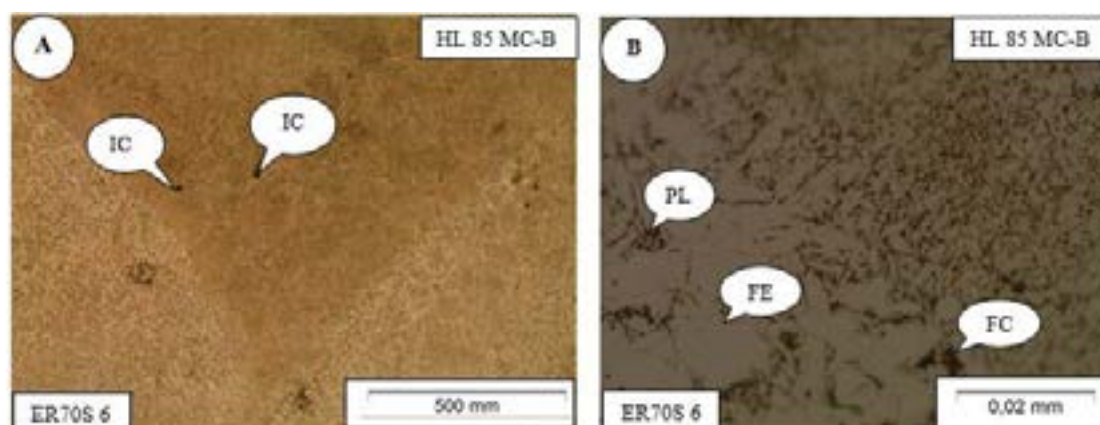


Figura 6: Análise metalográfica entre ER70S 6 e HL 85 MC-B (Fronteira). Do autor, 2023.

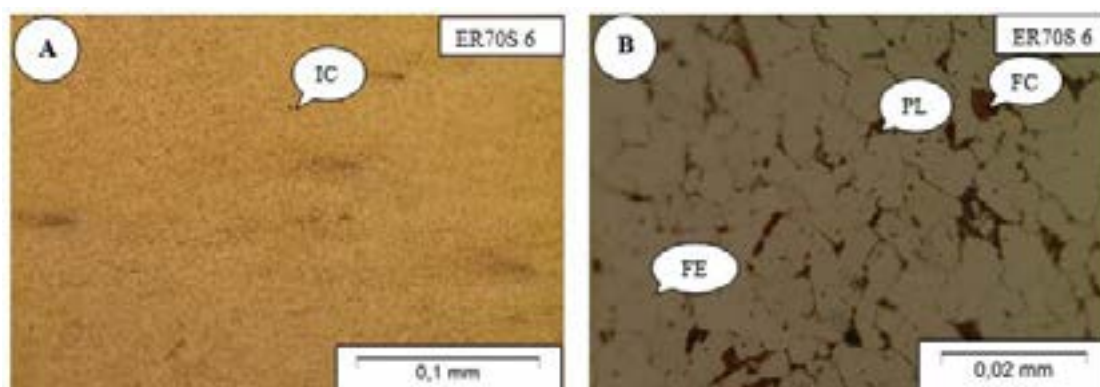


Figura 7: Análise metalográfica entre ER70S 6 e ER70S 6. Do autor, 2023.

Percebe-se então a inclusão de pequenos pontos na estrutura conforme Figura 6–A. Já para a Figura 6-B, com aumento de 1000 vezes, é possível avaliar grãos de ferrita equiaxiais nucleados no contorno de grão austenítico, bem como a formação de perlita nas regiões escuras e agregados de ferrita e carboneto originadas na transição entre a fase ferrita e o microconstituente perlita.

A Figura 7 demonstra as amostras com arame ER70S 6 vs ER70S 6, nota-se na Figura 7-A existe boa homogeneidade de tamanho de grãos, entretanto, ao avaliar a Figura 7-B com aumento de 1000 vezes percebe-se estruturas de ferritas equiaxiais (FE) e regiões de concentração de perlita (PL).

4 CONCLUSÃO

Após análises realizadas e resultados obtidos, pode-se concluir que:

As amostras aplicadas aos materiais ER70S 6 vs HL 85 MC-B apresentaram valores que corresponde ao esperado. O arame ER70S 6 é um metal para soldadura de uso geral que aplicado ao processo de manufatura aditiva apresentou uma dureza aproximada de um aço SAE 1045, material este que é considerado um aço com médio teor de carbono. Já ao se aplicar o arame HL 85 MC-B, a dureza se elevou a um nível comparado ao mesmo aço SAE 1045, porém, com tratamento térmico.

Para análise metalográfica, o arame ER70S 6 apresentou uma estrutura com tamanho de grãos maiores em relação ao HL 85 MC-B, onde, sabe-se que o tamanho de grão influencia na resistência mecânica do material. A estrutura com tamanho de grão menor, terá uma resistência mecânica maior. Isso se fez verdade ao ser realizado a análise de microdureza Vickers e constatado uma diferença com mais de 150 HV. Ainda, para as análises metalográficas, concluiu-se que as amostras obtiveram estrutura ferrítica e perlítica. Vale ressaltar, que a união entre os cordões depositados obteve boa homogeneidade, ponto este, positivo para o estudo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Universitário – UNISATC pelo apoio a pesquisa através do uso de sua estrutura de laboratórios e a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina – FAPESC pelo apoio financeiro na compra de equipamentos e insumos para pesquisa.

5 REFERÊNCIAS

- [1] Artaza, T.; Albert, A.; Murua, M.; Gorrotxategi, J.; Frías, J.; Puertas, G.; Melchor, M.; Mugica, D.; Suárez, A. **Design and integration of WAAM technology and in situ monitoring system in a gantry machine**. ScienceDirect. 2017, 778-785.
- [2] TARBENEIRO, I.; PASKUALA, A.; ÁLVEREZB, P.; SUÁREZCB, A. **Study on Arc Welding processes for High Deposition Rate Additive Manufacturin**. CIRP, Conference on Electro Physical and Chemical Machinin. Spain.V.68, p.358-362, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/Science/article/pii/S2212827117310363>. Acesso em: 29/07/2023.
- [3] Singh, S.; Ramakrishna, S.; Singh, R. **Material issues in additive manufacturing: A review**. J. Manuf. Process. 2017, 25, 185–200.
- [4] AWS D1.1/D1.1M:2020. Structural Welding Code – Steel. American Welding Society, 2020.
- [5] ESAB, ER70S 6. **% de análise típica de metal de solda**. 2023. Disponível em: https://esab.com/us/nam_en/products-solutions/product/filler-metals/mild-steel/mig-wires-tig-rods-gmaw-gtaw/weld-70s-6/. Acessado em: 26/08/2023.
- [6] BOHLER WELDING. **CONSUMÍVEIS PARA SOLDAGEM: Arames tubulares para a soldagem de aços carbono baixa liga**. SBR. P. 7. Disponível em: <http://sbrrevestimentos.com.br/assets/pdfs/bohler.pdf>. Acessado em: 27/08/2023.
- [7] H. A. HOLZMANN, J. V. B. RAZENTE, R. V. B. BISCAIA. **AVALIAÇÃO DA SOLDA MAG UTILIZANDO ARAME AWS A5.18 ER70S-6 EM MANUTENÇÃO DE PEÇAS DE AÇO AISI 4140**. The Journal of Engineering and Exact Sciences – jCEC, Vol. 06 N. 03 (2020). Disponível em: < <https://periodicos.ufv.br/jcec/article/view/10601/5917>>. Acessado em: 27/08/2023.
- [8] PAULA, M. **DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE SINTERFORJAMENTO A QUENTE DE UMA CRUZETA DE AÇO ABNT 1045**. Dissertação para obtenção do título de mestre em engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, escola de engenharia programa de pós-graduação em engenharia de minas, metalúrgica e de materiais - PPGE3M. Pág. 63. 2019. Disponível em: < <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/212390/001113831.pdf?sequence=1>> Acessado em: 28/08/2023.
- [9] RODRIGUES, L.; SANTOS, C.; VELOSO, R.; LEMOS, M.; CABRAL, R.; **Estudo da microestrutura e microdureza dos aços 1020 e 1060**. Centro Universitário de Volta Redonda - UniFOA, Faculdade de Tecnologia Campus Regional de Resende – UERJ. Pág. 39-44. Disponível em: < <https://unifoa.emnuvens.com.br/cadernos/article/view/263/215>> Acessado em: 28/08/2023.
- [10] AÇOS ESPECIAIS. **Aço 1045 temperado**. São Paulo. 2023. Disponível em: <https://www.acoespecial.com.br/aco-1045-temperado#:~:text=O%20a%C3%A7o%201045%20temperado%20possui,a%20sua%20inten%C3%A7%C3%A3o%20de%20obten%C3%A7%C3%A3o>. Acessado em: 28/08/23.



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil
26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG

25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental

Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

USE OF BIOCHAR PREPARED FROM THE AÇAÍ SEED AS ADSORBENT FOR THE UPTAKE OF CATECHOL FROM SYNTHETIC EFFLUENTS

Pâmela Vianini da Silva ⁽¹⁾

Éder Cláudio Lima ⁽¹⁾

Pascal Silas Thue ⁽²⁾

Beatris Lisbôa Mello ⁽¹⁾

Roberta Arlêu Teixeira ⁽¹⁾

Paula da Cruz ⁽¹⁾

Amanda Elisa Giovanaz ⁽¹⁾

Julio César Pacheco Vaghetti ⁽¹⁾

Fernando Marchioro Kasperiski ⁽³⁾

Flávio André Pavan ⁽⁴⁾

ABSTRACT

This work reports a simple methodology for the production of porous biochar (ABC) from açai seed residue, chemically activated with $ZnCl_2$ (1:1) in an inert atmosphere (N_2) at 650.0 °C. The obtained biochar was characterized by different analytical techniques and used as an adsorbent for catechol removal. The results of the biochar ABC characterization showed that the material has hydrophilic properties, while the specific surface area and the total pore volume are $1315 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ and $0.7038 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$, respectively. Adsorption studies demonstrated that Avrami's kinetic model and Freundlich's isotherm model were the ones that best suited the experimental results. The Q_{max} is $339.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (40 °C) with 98.36% removal of the effluent simulated in the laboratory, proving that the açai stone is an excellent biomass for the preparation of biochar and can be used with efficiency in the treatment of industrial effluents.

⁽¹⁾ Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil

⁽²⁾ Federal University of Pelotas, Brazil

⁽³⁾ Federal University of Health Sciences of Porto Alegre, Brazil

⁽⁴⁾ Federal University of Pampa, Bagé campus, Brazil

Keywords: açai kernel, biochar, adsorption, a phenolic compound.

1. INTRODUCTION

Water is an essential natural resource, a component of living beings, and essential to the life of various plant and animal species. However, water availability is increasingly threatened due mainly to industrial pollutants [1]. In addition, some factors have enormously contributed to water scarcity, such as increasing population, the growth of the agricultural and industrial sectors, and the disorderly discharge of industrial and urban effluents [2,3].

The phenolic compounds are water-soluble and toxic to the environment. Therefore, effluents containing phenolic compounds present severe environmental problems due to their high toxicity [4]. Furthermore, the intake of phenols in contaminated water can provoke muscle tremors, gastrointestinal damage, and death in living beings [5,6]. Due to their toxicity, phenol compounds are included in the Environmental Protection Agency's (EPA) list of risk pollutants, as they have carcinogens and cause numerous toxic and chronic effects, such as headaches, vomiting, anorexia, and other disorders [5,6].

Various processes have been used to remove phenols from wastewater, including membrane separation [7], electrochemical oxidation [8], photocatalytic Fenton processes [9], and biological processes [10]. However, these methods have limited applications and are complex and expensive. Conversely, adsorption is a suitable method for the treatment of organic compounds containing wastewater [11–13] because it is a simple, economical process, and it enables the use of the lignocellulosic materials in the pristine form [14] or as precursors for the preparation of adsorbents [15–17]. In addition, these adsorbents can be used to remove substances dissolved in water [16,17].

Residual Amazonian fruits biomasses such as açai [18], cupuassu [19], tucumã [20], and Pará chestnut [21] have been used to produce adsorbents in adsorption processes. Açai is a native Amazonian fruit produced by a palm tree called *Euterpe oleácea*. This fruit is essential for feeding the Amazonian population and of fundamental economic importance for many families that make their living from extractivism and fishing [18,22]. An estimate points out that Brazil in 2018 produced 221,000 tons of açai; the state of Pará alone was responsible for 66% of this production. However, about 85% to 95% of fruit waste is discarded after processing [23].

The pulp removed from the fruit's epicarp and mesocarp is the main form of commercialization of açai. However, the endocarp, commonly called the stone, is usually discharged after processing to remove the husk from the fruit. This waste is usually discharged, without any concern, into the environment, despite having several uses, such as making handicrafts, organic fertilizer, and animal feed [22]. Data from the Brazilian Institute of Geography and Statistics have indicated that the State of Pará, Brazil, in 2014 alone, produced 81,000 tons of açai seeds [22].

In order to provide a better destination, as well as to add value to those residues and reduce the environmental impact, this work proposed using açai seed biomass to prepare biochar material through the conventional pyrolysis process and its application as an adsorbent in the removal of the catechol from aqueous media. The produced biochar was characterized using several techniques: nitrogen adsorption/desorption isotherms, FTIR, TGA/DTG, CHN/O elemental analysis, Hydrophobicity Index (HI), and the zero point of charges (pH_{pzc}). Furthermore, the batch contact adsorption process was used to perform the adsorption studies. In addition, studies of batch contact adsorption (kinetic and equilibrium at different temperatures) were also performed to find the uptake mechanism between catechol and biochar carbon.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Biochar Carbon Preparation

Açai seeds were washed with tap water and dried at 105 °C for 4 hours. Afterward, the kernels were crushed in a knife mill in an analytical crusher and sieved using a 250 µm sieve.

Açaí-activated biochar was prepared using 60 grams of zinc chloride and 60 grams of açaí seed mixed in a beaker with deionized water for 1 hour until it became a homogeneous paste [23]. First, the temperature was set at 80 °C. Next, the paste formed was dried in an oven for 24 h at 80 °C. After drying, the paste was introduced into a quartz reactor in a vertical furnace, and it was heated step-by-step from 25 °C up to 650 °C utilizing a heating rate of 10 °C min⁻¹ under a N₂ atmosphere, with a flow rate of 200 mL min⁻¹. When the furnace temperature reached 650 °C, the system was maintained for 30 minutes [11,12]. Subsequently, the heating system was shut down, while the N₂ gas was maintained until the temperature became lower than 200 °C [11,12]. Afterward, 35 grams of the carbonized material was mixed with 300 mL of a 6 mol L⁻¹ HCl solution under reflux for 120 min at 90 °C to remove the zinc metal from the pyrolyzed material [11,12].

After leaching, the material was water-washed many times and filtered with a vacuum pump until obtaining a pH of about 6. Soon after, it was placed in an oven at 70 °C for 24 hours. The obtained material was denominated as ABC.

2.2. Characterization of Açaí-Activated Biochar

ABC has been subjected to characterizations of textural characteristics and functional groups. These characterizations help to investigate the contributing factors of the physical– chemical characteristics of ABC material for being utilized as an adsorbent.

The obtained ABC material's SBET and V_{total} were quantified using N₂ adsorption/desorption isotherms at -196.5 °C using an analyzer (Quantachrome NOVA 4200) [24]. Thermogravimetric (DTG) curves were obtained using a TA Instruments SDT Q 600 model. The material was analyzed using an inert atmosphere (N₂) from ambient temperature up to 800 °C and an air atmosphere from 800 °C to 1000 °C using 10.00 – 15.00 milligrams of adsorbent [21].

The functional groups on the surface and bulk of the ABC biochar were found by FTIR spectroscopy using a Bruker alpha model instrument. The ABC sample was dried in an oven and stored in a desiccator until the analysis was performed, which was carried out with a spectral resolution of 4 cm⁻¹ with 100 scans [27]. The carbon, hydrogen, and nitrogen elemental analysis were measured by employing a CHNS/O elemental analyzer (Agilent model 2400) [12,13]. In addition, the pH_{pzc} was obtained following the literature [11,12].

2.3. Adsorption Studies on ABC

Aqueous solutions of catechol (20 mL) with concentrations ranging from 200 to 1000 mg·L⁻¹ were added to flat 50.0 mL conic polyethylene tubes containing 30 milligrams of ABC. Afterward, the tubes were capped and disposed of in a pendular shaker (Oxylab, São Leopoldo, RS, Brazil) with a thermostatic temperature, shaking at a speed of 120 rpm [11,12].

The equilibrium experiment data were fitted with the nonlinear models of Freundlich and Langmuir, which are commonly employed in the literature [25,26]. The adsorption kinetics were fitted using the nonlinear pseudo-first order, pseudo-second order, and Avrami fractional order models [25,26].

The thermodynamic equilibrium constant values K°_e was acquired from the equilibrium studies from 283 to 318 K [39,40]. Values of the ΔH° and ΔS° of adsorption were calculated based on the nonlinear van't Hoff equation [27,28].

2.4. Synthetic Wastewater

A simulated effluent was prepared by mixing various inorganic and organic molecules detected typically in industrial waste [12,14] to evaluate the performance of the ABC biochar prepared from açaí kernels for potential application in wastewater treatment. The final pH was adjusted to pH 7.0.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Textural Characteristics

Pore size distribution (PSD) and the specific surface area (S_{BET}) are two fundamental parameters that affect the quality and usefulness of material for the adsorption process [23–24]. In addition, several studies have addressed the efficiency of an adsorbent as closely linked to specific surface area and pore size distribution [12,20]. Figure 1 presents the plot of the isotherm of adsorption/desorption of nitrogen and the distribution curve of the size of the pores.

The values of textural characteristics of ABC carbon material are depicted in Table 1. The values obtained for the textural surface of the ABC material were S_{BET} 1315 $m^2 \cdot g^{-1}$, the area assigned to micropores was 170 $m^2 \cdot g^{-1}$, and the external surface area was 1145 $m^2 \cdot g^{-1}$. The format of the isotherm of adsorption of N_2 is characteristic of predominantly microporous materials [29].

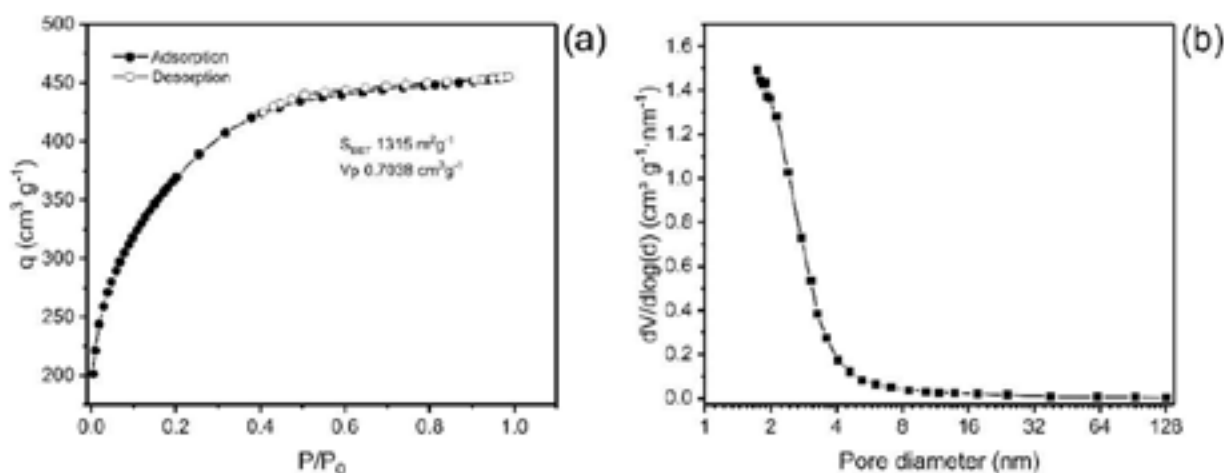


Figure 1: (a) Isotherm of adsorption and desorption of N_2 ; (b) Pore size distribution curve.

Table 1: Specific surface area and pore volume of ABC carbon.

Parameters	Value
Total surface area ($m^2 \cdot g^{-1}$)	1315
Micropore surface area ($m^2 \cdot g^{-1}$)	170
External surface area ($m^2 \cdot g^{-1}$)	1145
Total pore volume ($cm^3 \cdot g^{-1}$)	0.7038
Volume of micropores ($cm^3 \cdot g^{-1}$)	0.0720
Volume of mesopores ($cm^3 \cdot g^{-1}$)	0.6318

The curve of the pore size distribution of the carbon material presents a maximum at pores < 2 nm, and it decreases exponentially as the pore size increases, showing that the material is predominantly microporous pores ($\varphi < 2$ nm), with a small portion of mesopores ($2 < \varphi < 50$ nm) and a tiny proportion of macropores ($\varphi > 50$ nm) (Figure 1b) [29].

ABC had high surface area (S_{BET}) and total pore volume (V_{total}) values compared with other materials presented in the literature. For example, Tran *et al.* [30] produced activated biochar utilizing pomelo peel as a carbon precursor, and the biochar presented a surface area ranging from 1033 to 1292 $m^2 \cdot g^{-1}$; Hu *et al.* [31] produced sludge-derived biochar that was chemically activated with NaOH

and KOH, obtaining S_{BET} of 756–814 $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$; Quin *et al.* [32] prepared activated biochar from rape straw that was activated with KOH in different proportions of activating agent, obtaining surface areas from 1002 to 1531 $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ and total pore volume of 0.64 to 1.03 $\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$. Therefore, the values of the textural characteristics of ABC carbon material agree with previous results of activated biochars.

This result also indicates that employing the ZnCl_2 as activating agent can enhance the surface area and the pore volume of the biochar material, characterized by an increase in the nitrogen adsorption amount [12].

3.2. TGA Analysis

TGA is carried out to check samples' thermal degradation or stability in a defined atmosphere. In this case, TGA was performed on an ABC sample. The experiment was conducted in a N_2 atmosphere from ambient temperature up to 800 °C and using a synthetic air atmosphere from 800 °C to 1000 °C. At 1000 °C, carbon's complete decomposition occurs, resulting in inorganic residues that can be attributed to ashes [12]. Figure 2 presents the thermal degradation of the biochar material. The curve presents four stages.

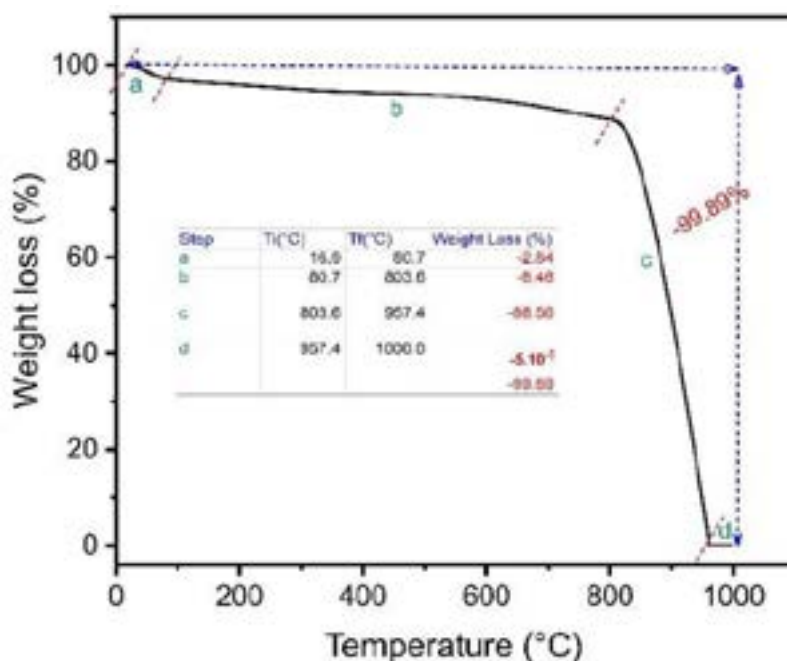


Figure 2: Thermogravimetric analysis of ABC biochar.

The first stage, ranging from 16.9 °C to 80.7 °C, corresponds to the weight loss of the absorbed water in the carbon matrix ABC [20]. The weight-loss percentage in this first step was about 2.84%. The second weight-loss step ranged from 80.7 to 803.6 °C, where the weight-loss percentage was 8.48%. This result demonstrates that the material is thermally stable in this temperature range, favoring its use even at high temperatures [20]. The third stage of weight loss (803.6–957.4 °C) corresponds to the decomposition of the ABC matrix in the presence of oxygen, presenting a major weight loss of 88.56%. A very slight weight loss was observed from 957.4 to 1000 °C (–0.005%). The total weight loss was 99.89%, meaning only a small residual mass was left (0.11%), corresponding to the ash content since the air atmosphere was used from 800 °C to 1000 °C [20].

3.3. Infrared Spectroscopy (FTIR)

Chemical characterization of functional groups in the bulk phase and on the surface of the biochar material was studied using a Fourier Transform Infrared (FTIR) spectrometer (Bruker, model

alpha) in the range 4000–400 cm^{-1} . This analysis enables a better understanding of the material's surface characteristics needed for more effective adsorption. The main components of açai biomass are hemicellulose, cellulose, lignin, and tannin. Thus, activated biochar may present functional groups on its surface, including phenols, carboxylic, esters, and alcohols, which are involved in the adsorption process [33]. Figure 3 shows the infrared spectrum of ABC biochar. The intense and wide band at 3433 cm^{-1} is ascribed to stretching N-H or O-H moieties [33]. The peaks found at 2856 and 2924 cm^{-1} , respectively, are attributed to symmetric and asymmetric C-H groups' stretches [33]. The band at 1621 cm^{-1} is assigned to the stretch of O=C carboxylate [33]. The tiny bands at 1545 and 1425 cm^{-1} are attributed to the ring mode of arene compounds [33]. The shoulder at 1236 cm^{-1} is attributed to the C-C-C stretching of aryl-alkyl groups [33]. The band at 1155 and 1105 cm^{-1} corresponds to the C-C-O of ester or C-O-C of ether stretching [33]. The band at 1034 cm^{-1} is ascribed to C-O of phenolic groups or carboxylate stretch [33]. Finally, the band at 876 cm^{-1} is attributed to the -CH out-of-plane bending of aromatics [33]. The band at 545 cm^{-1} can be assigned to Zn-O left in the carbonaceous matrix [33]. Based on this founding, it is possible to say that ABC material showed several functional groups at its surface that may be bound with catechol in aqueous media by hydrogen bonds or π - π interactions principally.

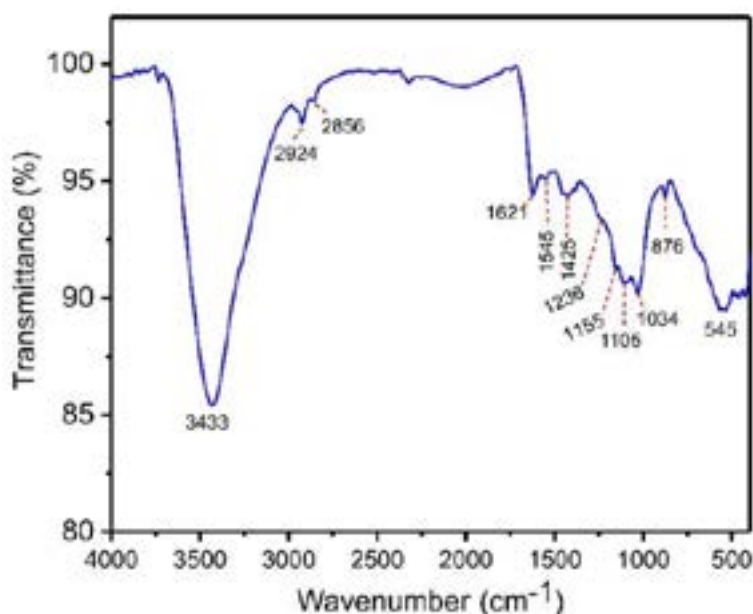


Figure 3: FTIR spectra of ABC biochar.

3.4. Elemental Analysis

The results of the elemental analysis of ABC carbon are shown in Table 2.

Table 2: Elemental analysis of ABC carbon and raw açai seed.

Sample	% C	% H	% N	% Ashes ^a	% O ^b
Raw açai seed	43.29	5.98	1.25	1.89	47.59
ABC	72.20	3.33	1.63	0.11	22.73

^aCalculated from the TGA method. ^bCalculated by difference %O = 100% - (%C + %H + %N + %ashes).

Compared to the açai biomass material, ABC exhibited a very high amount of carbon content and a small amount of oxygen content. In fact, açai biomass initially exhibited 43.29% carbon, 5.98%

hydrogen, 1.25% of nitrogen, and 47.59% oxygen, but after carbonization in an inert atmosphere and washing process, the carbon content increased to 72.20%, while oxygen content decreased to 22.73% (See Table 2). Indeed, higher carbon content indicates that the aromatic structure becomes dominant after carbonization in the presence of zinc chloride. It was also possible with TGA analysis to determine the ash containing the ABC sample (0.11%). The ash content is attributed to the inorganic compound left after pyrolysis in the synthetic air atmosphere [12,20]. We can notice in Table 2 that the ash content was very small for the biomass precursor (1.89%) and only 0.11% for the prepared ABC material. This indicates that all the inorganics were removed after leaching, leaving the material with more pores [12,20]. Moreover, the very small value of ash content on açai biomass (1.89%) may show the good potential of that residue to be used as a precursor in the preparation of biochar material or biosorbents.

3.5. Hydrophobicity Test (HI)

The hydrophobicity–hydrophilicity (HI) resulted in a value of 0.8420, which indicates that ABC has a greater affinity for water, thus being classified as hydrophilic [12,25].

This property could originate from the total functional groups composed of the acidic and basic groups. In fact, the functional groups such as carboxyl ($-\text{COOH}$), hydroxyl ($-\text{OH}$), carbonyl ($\text{C}=\text{O}$), amides ($\text{O}=\text{C}-\text{NH}-$), and amine ($-\text{NH}_2$, $-\text{NH}$), available in the ABC biochar material could be associated with the uptake of $\text{H}_2\text{O}_{(\text{g})}$ by the hydrogen-bond formation. Furthermore, observing the molecular volume of water (19.51 \AA^3) and n-heptane (130.0 \AA^3) obtained by van der Waals calculation, it is possible to state that the adsorption of $\text{H}_2\text{O}_{(\text{g})}$ could be more favorable because of the micropore structures of ABC biochar material (see Table 1). In contrast, $\text{C}_7\text{H}_{16(\text{g})}$ adsorption molecules will be complicated. This result is very similar to Thue *et al.* [23], who obtained $\text{HI} < 1$ for activated carbons prepared from sawdust, using ZnCl_2 as an activating agent in their work. It is also highlighted that biochar materials with a high amount of C-content and the least O-content, resulting in a high level of aromatization during the pyrolysis process, tend to present hydrophobic properties. This hydrophilic behavior of ABC carbon material is important for the material to be a potential adsorbent to remove emerging organic contaminants.

3.6. Zero-Charge Point (pH_{pcz})

The zero-charge point is an important parameter, as it shows the pH value at which a solid is zero electrically charged on its surface. The pH_{pcz} value of the adsorbent provides relevant information about the conditions under which the solid–liquid adsorption process takes place and how easily an adsorbent can absorb hazardous substances [23]. The surface of the adsorbent is negative when the pH of the solution exceeds the pH_{pcz} value and thus favors the adsorption of positively charged species, whereas when the pH of the solution is lower than pH_{pcz} , the surface of the adsorbent will be positively charged and thus the adsorption of adsorbate with a negative charge is favored [23]. Figure 4 shows the pH_{pcz} of the ABC sample prepared with zinc chloride. The pH_{pcz} value of the biochar material was 6.01, which tends to be neutral. This result can be justified by the presence of both acid and basic groups at the material's surface. The result also indicates that at pH 7, the pH of the preparation solution of catechol, the surface of the ABC biochar was negatively charged. Therefore, the adsorption process will be facilitated if the adsorbate molecules are positively charged in the solution.

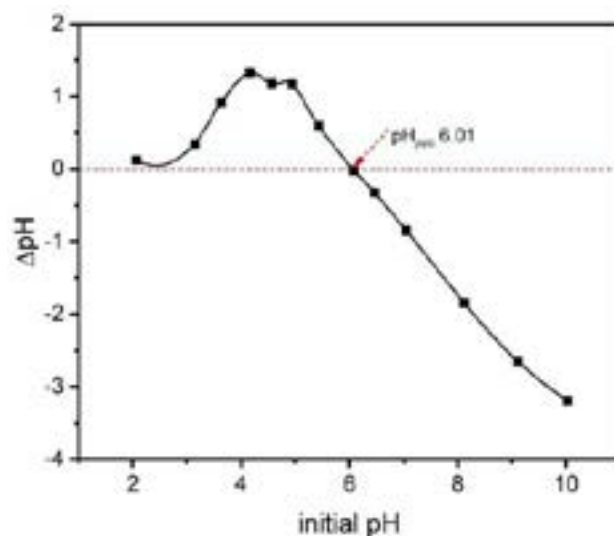


Figure 4: The pH_{pzc} of ABC.

3.7. Adsorption Kinetics

To provide relevant information about the adsorption process, the study of kinetics is of fundamental importance [26,34]. The experimental operating conditions were pH 7.0, temperature 25 °C, under constant shaking (150 rpm). Figure 5 illustrates the relationship between the adsorption capacity at any time (q_t) and the contact time. The data were fitted with nonlinear models that describe the kinetic behavior.

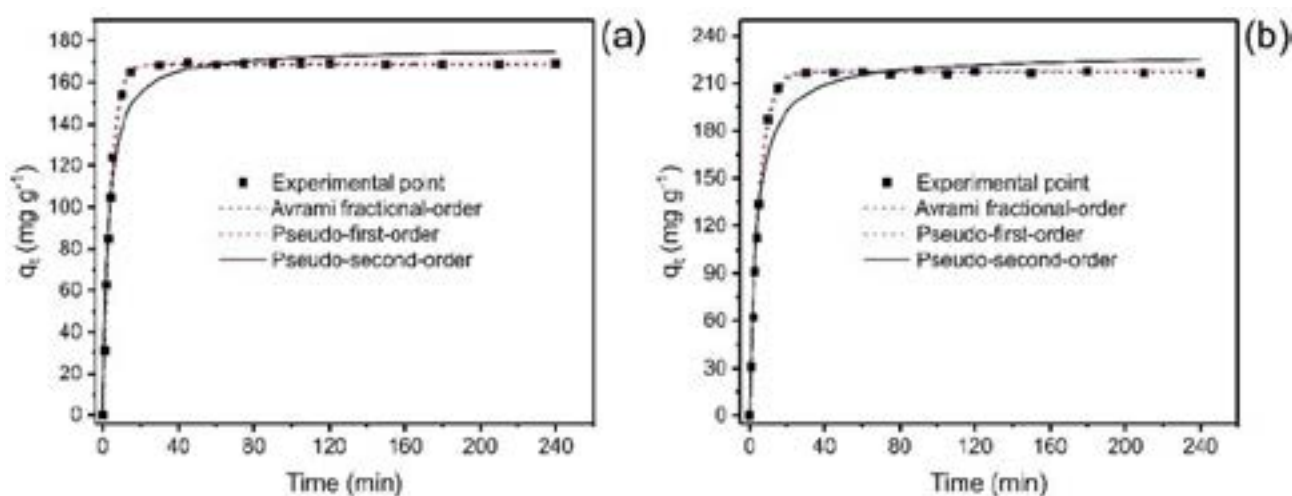


Figure 5: Kinetic curves for the adsorption of catechol. (a) C_0 350 mg L⁻¹; (b) 700 mg·L⁻¹. Adsorbent mass 30 milligrams; temperature 25 °C, and pH 7.

In the initial stages, the adsorption process is faster due to the many sites available; when the equilibrium approaches, adsorption becomes slower. Over time, the number of empty sites decreases, and the repulsive forces of the phenol molecules already adsorbed make the adsorption in the remaining sites difficult [25-26].

Figure 5 shows that the saturation time was below 40 min for both concentrations, which implies that this time is sufficient to reach the equilibrium for catechol adsorption. However, it is also possible to observe that concentration did affect the equilibrium time of the adsorption process when the catechol concentration was doubled (from 350 to 700 mg·L⁻¹). Therefore, nonlinear kinetic models of the pseudo-first order, pseudo-second order, and fractional order of Avrami order [25] were applied to relate the experiment data with mathematical models available in the literature, thus predicting the

adsorption behavior.

In order to validate the models and choose the one that best explains the adsorption phenomena, the adjusted determination coefficients (R^2_{adj}) and standard deviation of residuals (SD) were considered, where the lower SD values and higher R^2_{adj} tending to 1.0 suggest less disparity between the theoretical and experimental equilibrium adsorption capacities (q_t) [25,26]. Among the three kinetic models employed to adjust the experimental kinetic data, the Avrami model showed the lowest standard deviation of the residues (SD) (ranging from 0.8897 to 1.402) and the highest R^2_{adj} (ranging from 0.9993 to 0.9999) at both concentrations. This could confirm that q_t values obtained experimentally are closer to those found by the model. In addition, the BIC was also tested to check the statistical accuracy of the kinetic models [25,26]. When the Δ BIC of two models ≥ 10 , the model with lower BIC values is certainly the best-fitted model [25,26]. The Δ BIC between PFO and Avrami and PSO and Avrami were 12.25–37.44 and 54.38–95.56, respectively. Based on these results, the Avrami fractional-order model best describes the kinetics of the uptake of catechol onto ABC carbon material.

Considering that the Avrami fractional-order model was the best kinetic model to fit the experimental data, the most truthful values of $t_{1/2}$ and $t_{0.95}$ are based on this model. The values of $t_{1/2}$ ranged from 2.922 to 3.790 min and $t_{0.95}$ from 11.09 to 14.26 min (Avrami fractional model). Therefore, an increase in the initial concentration of adsorbate can increase the time needed to reach equilibrium [25]. Therefore, in further equilibrium studies, the contact time was fixed at 30 min.

3.8. Adsorption Isotherm

At constant temperature, adsorption isotherms are used to describe the relationship between the amount of adsorbate adsorbed by the ABC biochar (q_e) and the remaining concentration of adsorbate in the solution after the system reaches equilibrium (C_e) [25].

The experiment data analysis was fitted using the Liu, Freundlich, and Langmuir equilibrium models, at temperatures between 10 °C and 45 °C under the following experimental conditions: 1.5 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ adsorbent dosage; initial pH of 7.0; and using a contact time of 30 minutes. The result of the isotherm curve is shown in Figure 6.

The statistical analysis of the fitted models was based on R^2_{adj} , SD, and BIC values. The Liu isotherm model presented the values of R^2_{adj} closer to 1, the lowest values of SD and BIC [25,26]. As observed for the kinetic results, the Δ BIC values between the Langmuir and Liu and Freundlich and Liu models were always >10 , suggesting that the uptake equilibrium of catechol onto ABC carbon material from 10 °C to 45 °C was better explained based on the Liu isotherm model. The values of Q_{max} for the uptake of catechol using ABC carbon material ranged from 243.6 to 339.5 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, the maximum value obtained at 40 °C.

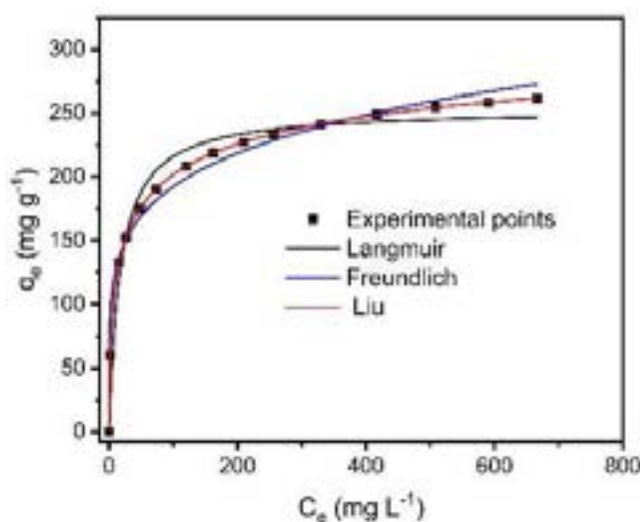


Figure 6: Isotherm of adsorption of catechol at 40 °C.

3.9. Simulated Effluent Removal

Aiming to investigate the efficiency of ABC biochar in removing contaminants in an aqueous media, we simulated an effluent with varied compositions. As a result, the UV–VIS spectra of treated and untreated effluents were observed from 190 to 800 nm, as shown in Figure 7.

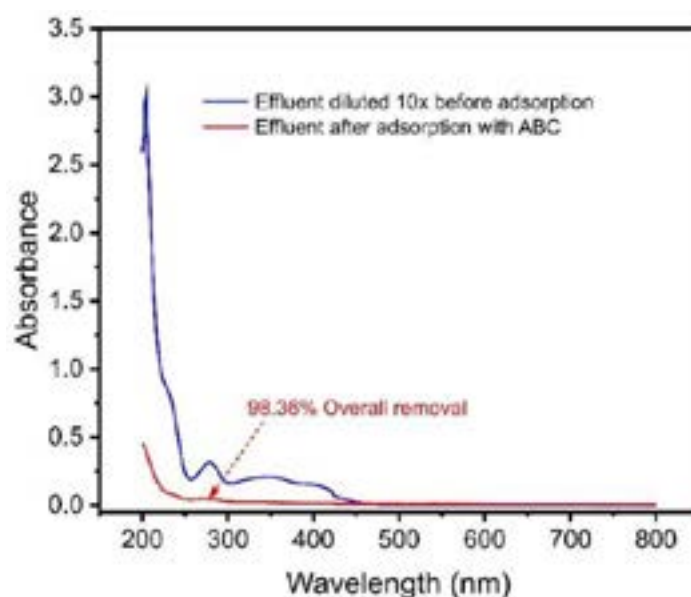


Figure 7: UV–VIS spectra of synthetic effluent before adsorption and after treatment with ABC biochar.

The spectral scan (Figure 7) indicated that after the adsorption process, the effluent decreased the intensity of its bands more than six times, corresponding to 98.36% adsorption of the contaminants in the solution. This result shows that açai seed-based biochar material can be applied to remove compounds from real effluents contaminated with phenols.

Furthermore, the removal of catechol from the effluent was evaluated using a chemometric approach [35], and the removal of catechol in the simulated effluent attained 99.4% removal, indicating that ABC carbon material is efficient for the removal of catechol from simulated industrial effluents.

4. CONCLUSION

In this work, the seed of açai fruit was used as a precursor material for producing biochar material in a conventional oven under an inert atmosphere, and ZnCl_2 as the activating agent in the proportion of 1:1. The activated biochar obtained under these conditions had the following characteristics: total surface area of $1315 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, total pore volume of $0.7040 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$, and total mesopore volume of $0.6320 \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$. In addition, the elemental analysis showed that activated carbon has a high carbon content of 72.2%; the hydrophobicity test revealed the material to be predominantly hydrophilic; the zero charge point of ABC carbon is 6.01; FTIR showed that the carbon surface has oxygenated groups, which confers negative charge density on the surface that can establish interactions with phenol molecules, and thermogravimetric analysis revealed that the material has a certain thermal stability at a high temperature.

The kinetic study revealed that the catechol adsorption was fast initially, reaching 95% of saturation in less than 15 minutes for both concentrations at a temperature of $25 \text{ }^\circ\text{C}$, the Avrami model being the one that best fit the experimental data. Regarding the equilibrium study, it was noticed that at $40 \text{ }^\circ\text{C}$, the maximum adsorption capacity was $339.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, the maximum adsorption capacity of catechol based on the Liu isothermal model. The effluent test showed that ABC carbon has a sufficient adsorption capacity for industrial effluents containing phenols (removal $> 98\%$), and the individual removal of catechol from the simulated effluent attained 99.4% removal.

REFERENCES

- [1] Parida, V.K.; Saidulu, D.; Majumder, A.; Srivastava, A.; Gupta, B.; Gupta, A.K. Emerging contaminants in wastewater: A critical review on occurrence, existing legislation, risk assessment, and sustainable treatment alternatives. *J. Environ. Chem. Eng.* 2021, 9, 105966.
- [2] Rodriguez-Narvaez, O.M.; Peralta-Hernandez, J.M.; Goonetilleke, A.; Bandala, E.R. Treatment technologies for emerging contaminants in water: A review. *Chem. Eng. J.* 2017, 323, 361–380.
- [3] Rizzo, L.; Malato, S.; Antakyali, D.; Beretsou, V.G.; Đolić, M.B.; Gernjak, W.; Heath, E.; Ivancev-Tumbas, I.; Karaolia, P.; Ribeiro, A.R.L.; et al. Consolidated vs. new advanced treatment methods for the removal of contaminants of emerging concern from urban wastewater (Review). *Sci. Total Environ.* 2019, 655, 986–1008.
- [4] Kottuparambil, S.; Kim, Y.J.; Choi, H.; Kim, M.S.; Park, A.; Park, J.; Shin, W.; Han, T. A rapid phenol toxicity test based on photosynthesis and movement of the freshwater flagellate, *Euglena agilis* Carter. *Aquat. Toxicol.* 2014, 155, 9–14.
- [5] NORMAN. The Network of Reference Laboratories, Research Centres, and Related Organizations for Monitoring of Emerging Environmental Substances. 2022. Available online: www.norman-network.net (accessed on 7 September 2022).
- [6] Michałowicz, J.; Duda, W. Phenols—Sources and Toxicity. *Polish J. Environ. Stud.* 2007, 16, 347–362.
- [7] Qu, Y.; Qin, L.; Guo, M.; Liu, X.; Yang, Y. Multilayered molecularly imprinted composite membrane based on porous carbon nanospheres/pDA cooperative structure for selective adsorption and separation of phenol. *Sep. Purif. Technol.* 2022, 280, 119915.
- [8] Zhang, Z.; Yi, G.; Li, P.; Wang, X.; Wang, X.; Zhang, C.; Zhang, Y.; Sun, Q. Eu/GO/PbO₂ composite-based anode for highly efficient electrochemical oxidation of hydroquinone. *Colloids Surf. A* 2022, 642, 128632.
- [9] Ke, P.; Zeng, D.; Wang, R.; Cui, J.; Li, X.; Fu, Y. Magnetic carbon microspheres as a reusable catalyst in heterogeneous Fenton system for the efficient degradation of phenol in wastewater. *Colloids Surf. A* 2022, 638, 128265.
- [10] Shahabivand, S.; Mortazavi, S.S.; Mahdavinia, G.R.; Darvishi, F. Phenol biodegradation by immobilized *Rhodococcus qingshengii* isolated from coking effluent on Na-alginate and magnetic chitosan-alginate nanocomposite. *J. Environ. Manag.* 2022, 307, 114586.
- [11] Leite, A.J.B.; Sophia, A.C.; Thue, P.S.; dos Reis, G.S.; Dias, S.L.P.; Lima, E.C.; Vaghetti, J.C.P.; Pavan, F.A.; de Alencar, W.S. Activated carbon from avocado seeds for the removal of phenolic compounds from aqueous solutions. *Desalin. Water Treat.* 2017, 71, 168–181.
- [12] Cunha, M.R.; Lima, E.C.; Lima, D.R.; da Silva, R.S.; Thue, P.S.; Seliem, M.K.; Sher, F.; dos Reis, G.S.; Larsson, S.H. Removal of captopril pharmaceutical from synthetic pharmaceutical-industry wastewaters: Use of activated carbon derived from *Butia catarinensis*. *J. Environ. Chem. Eng.* 2020, 8, 1–9.
- [13] Thue, P.S.; dos Reis, G.S.; Lima, E.C.; Sieliechi, J.M.; Dotto, G.L.; Wamba, A.G.N.; Dias, S.L.P.; Pavan, F.A. Activated carbon obtained from Sapelli wood sawdust by microwave heating for o-cresol adsorption. *Res. Chem. Intermed.* 2017, 43, 1063–1087.
- [14] Yao, X.; Ji, L.; Guo, J.; Ge, S.; Lu, W.; Chen, Y.; Cai, L.; Wang, Y.; Song, W. An abundant porous biochar material derived from wakame (*Undaria pinnatifida*) with high adsorption performance for three organic dyes. *Bioresour. Technol.* 2020, 318, 124082.
- [15] Amole, A.R.; Araromi, D.O.; Alade, A.O.; Afolabi, T.J.; Adeyi, V.A. Biosorptive removal of nitrophenol from aqueous solution using ZnCl₂ - modified groundnut shell: Optimization, equilibrium, kinetic, and thermodynamic studies. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 2021, 18, 1859–1876.
- [16] Carvalho, C.O.; Rodrigues, D.L.C.; Lima, E.C.; Umpierrez, C.S.; Chaguezac, D.F.C.; Machado, F.M. Kinetic, equilibrium, and thermodynamic studies on the adsorption of ciprofloxacin by activated carbon produced from Jerivá (*Syagrus romanzoffiana*). *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2019, 26, 4690–4702.
- [17] Leite, A.J.B.; Saucier, C.; Lima, E.C.; dos Reis, G.S.; Umpierrez, C.S.; Mello, B.L.; Shirmardi, M.; Dias, S.L.P.; Sampaio, C.H. Activated carbons from avocado seed: Optimization and application for removal of several emerging organic compounds. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2018, 25, 7647–7661.
- [18] Nascimento, B.F.; de Araujo, C.M.B.; do Nascimento, A.C.; da Silva, F.L.H.; de Melo, D.J.N.; Jaguaribe, E.F.; Cavalcanti, J.V.F.L.; da Motta Sobrinho, M.A. Detoxification of sisal bagasse hydrolysate using activated carbon produced from the gasification of açai waste. *J. Hazard. Mater.* 2021, 409, 124494.
- [19] Brito, M.J.P.; Borges, J.F.; de Oliveira, T.P.; Santos, M.P.F.; de Souza, E.C., Jr.; Santos, L.S.; Bonomo, R.C.F.; Veloso, C.M. Royal blue dianix CC dye adsorption onto biochars: Kinetics, diffusion modeling, equilibrium, and thermodynamic adsorption data. *Desalin. Water Treat.* 2020, 197, 424–437.
- [20] Thue, P.S.; Umpierrez, C.S.; Lima, E.C.; Lima, D.R.; Machado, F.M.; dos Reis, G.S.; da Silva, R.S.; Pavan, F.A.; Tran, H.N. Single-step pyrolysis for producing magnetic activated carbon from tucumã (*Astrocaryum aculeatum*) seed and nickel(II) chloride and zinc(II) chloride. Application for removal of Nicotinamide and Propanolol. *J. Hazard. Mater.* 2020, 398, 122903.
- [21] Thue, P.S.; Lima, D.R.; Naushad, M.; Lima, E.C.; Albuquerque, Y.R.T.; Dias, S.L.P.; Cunha, M.R.C.; Dotto, G.L.; Brum, I.A.S. High removal of emerging contaminants from wastewater by activated carbons derived from the shell of cashew of

- Para. Carbon Lett. 2021, 31, 13–28. [CrossRef] [22] Domingues, A.F.N.; Mattietto, R.A.; Oliveira, M. Lipid Content in Euterpe oleracea Mart. Embrapa Amazônia Oriental-Research and Development Bulletin. 2017. Available online: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1062268/1/BOLETIMPD115Ainfo.pdf> (accessed on 22 September 2022).
- [23] Thue, P.S.; Lima, E.C.; Sieliechi, J.M.; Saucier, C.; Dias, S.L.P.; Vagheti, J.C.P.; Rodembusch, F.S.; Pavan, F.A. Effects of first-row transition metals and impregnation ratios on the physicochemical properties of microwave-assisted activated carbons from wood biomass. *J. Colloid Interface Sci.* 2017, 486, 163–175.
- [24] dos Reis, G.S.; Guy, M.; Mathieu, M.; Jebrane, M.; Lima, E.C.; Thyrel, M.; Dotto, G.L.; Larsson, S.H. A comparative study of chemical treatment by MgCl₂, ZnSO₄, ZnCl₂, and KOH on physicochemical properties and acetaminophen adsorption performance of biobased porous materials from tree bark residues. *Colloids Surf. A.* 2022, 642, 128626.
- [25] Lima, E.C.; Dehghani, M.H.; Guleria, A.; Sher, F.; Karri, R.R.; Dotto, G.L.; Tran, H.N. Adsorption: Fundamental aspects and applications of adsorption for effluent treatment. In *Green Technologies for the Defluoridation of Water*; Dehghani, M.H., Karri, R., Lima, E.C., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2021; pp. 41–88.
- [26] Lima, E.C.; Sher, F.; Guleria, A.; Saeb, M.R.; Anastopoulos, I.; Tran, H.N.; Hosseini-Bandegharaei, A. Is one performing the treatment data of adsorption kinetics correctly? *J. Environ. Chem. Eng.* 2021, 9, 104813.
- [27] Lima, E.C.; Hosseini-Bandegharaei, A.; Moreno-Piraján, J.C.; Anastopoulos, I. A critical review of the estimation of the thermodynamic parameters on adsorption equilibria. Wrong use of equilibrium constant in the Van't Hoff equation for calculation of thermodynamic parameters of adsorption. *J. Mol. Liq.* 2019, 273, 425–434.
- [28] Lima, E.C.; Hosseini-Bandegharaei, A.; Anastopoulos, I. Response to “Some remarks on a critical review of the estimation of the thermodynamic parameters on adsorption equilibria. Wrong use of equilibrium constant in the van't Hoff equation for calculation of thermodynamic parameters of adsorption”. *J. Mol. Liq.* 2019, 280, 298–300.
- [29] Thommes, M.; Kaneko, K.; Neimark, A.V.; Olivier, J.P.; Rodriguez-Reinoso, F.J.; Rouquerol, K.S.; Sing, W. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of the surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure Appl. Chem.* 2015, 87, 1051–1069.
- [30] Tran, H.N.; Tomul, F.; Nguyen, H.T.H.; Nguyen, D.T.; Lima, E.C.; Le, G.T.; Chang, C.T.; Masindi, V.; Woo, S.H. Innovative spherical biochar for pharmaceutical removal from water: Insight into adsorption mechanism. *J. Hazard. Mater.* 2020, 394, 122255.
- [31] Hu, J.; Zhao, L.; Luo, J.; Gong, H.; Zhu, N. A sustainable reuse strategy of converting waste activated sludge into biochar for contaminants removal from water: Modifications, applications, and perspectives. *J. Hazard. Mater.* 2022, 438, 129437.
- [32] Qin, Y.; Chai, B.; Wang, C.; Yan, J.; Fan, G.; Song, G. Removal of tetracycline onto KOH-activated biochar derived from rape straw: Affecting factors, mechanisms, and reusability inspection. *Colloids Surf. A* 2022, 640, 128466.
- [33] Smith, B. *Infrared Spectral Interpretation: A Systematic Approach*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 1999; 264p, ISBN 0-8493-2463-7.
- [34] Guy, M.; Mathieu, M.; Anastopoulos, I.P.; Martínez, M.G.; Rousseau, F.; Dotto, G.L.; de Oliveira, H.P.; Lima, E.C.; Thyrel, M.; Larsson, S.H.; et al. Process Parameters Optimization, Characterization, and Application of KOH-Activated Norway Spruce Bark Graphitic Biochars for Efficient Azo Dye Adsorption. *Molecules* 2022, 27, 456.
- [35] Lima, D.R.; Gomes, A.A.; Lima, E.C.; Umpierrez, C.S.; Thue, P.S.; Panzenhagen, J.C.P.; Dotto, G.L.; El-Chaghaby, G.A.; de Alencar, W.S. Evaluation of efficiency and selectivity in the sorption process assisted by chemometric approaches: Removal of emerging contaminants from water. *Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc.* 2019, 218, 366–373.



42° SENAFOR

26ª Conferência Internacional de Forjamento – Brasil
26th International Forging Conference

25ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas / 12ª Conferência Internacional de Conformação de Chapas / 9º Congresso do BrDDRG
25th National Sheet Metal Forming Conference / 12th International Sheet Metal Forming Conference / 9th BrDDRG Congress

12ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis
12th International Conference on Materials and Processes for Renewable Energies – Brazil/RS

Centro de Eventos do Hotel Continental
Porto Alegre/RS 4, 5 e 6 de outubro de 2023 / October 4-6, 2023

DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVO PARA AVALIAR BIOLUBRIFICANTES COM ÊNFASE NA PRECISÃO DA MEDIÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO

Germano Lasch ⁽¹⁾
Régis H. da S. Souza ⁽²⁾
Gustavo S. Gehlen ⁽³⁾
Jean C. Poletto ⁽³⁾
Yago M. Dias ⁽²⁾
Arthur M. Alles ⁽²⁾
Gabriel G. Leturiondo ⁽²⁾
Luiza O. Coelho ⁽²⁾
Liu Y. de Barros ⁽⁴⁾
Ney F. Ferreira ⁽⁴⁾
Patric D. Neis ⁽⁴⁾

RESUMO

A lubrificação é essencial como ferramenta de controle do atrito. Dessa forma, é importante possuir equipamentos que consigam adquirir dados de testes de lubrificação de maneira mais precisa. O equipamento que o Laboratório de Tribologia (LATRIB) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) possui para realizar ensaios de medição de coeficiente de atrito não foi originalmente desenvolvido para avaliar os baixos atritos de contatos lubrificados, dessa forma, este trabalho buscou desenvolver um dispositivo com células de carga (DCC) visando avaliar biolubrificantes com precisão na medição do coeficiente de atrito. Utilizando a equação de Kleine e Mcclintock, foi comparado o erro máximo dos métodos de aquisição onde o DCC apresenta uma melhora de $\pm 12,6\%$ quando comparado com o sistema de leitura e aquisição de dados do tribômetro do tipo pino-sobre-disco (PoD). Vale ressaltar que as condições de ensaio para gerar o erro máximo, em ambos os sistemas de aquisição, são extremamente específicas e raramente utilizadas. Ambos os sistemas de leitura e aquisição de dados foram comparados em um teste, onde foi avaliado o coeficiente de atrito de três

⁽¹⁾ Master student; PROMEC, Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil,

⁽²⁾ Graduation student; DEMEC, Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil.

⁽³⁾ Ph. D. researcher; Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil.

⁽⁴⁾ Prof. Dr.; Laboratory of Tribology, Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil.

biolubrificantes, óleo de mamona (OM) e suas versões aminolisada (OMA) e transesterificada (OMT). No teste, é possível verificar que o dispositivo com células de carga possui resultados compatíveis com o sistema de aquisição e controle de dados original do PoD. Quanto ao comportamento dos biolubrificantes durante o teste, o óleo base de mamona, OM, apresentou o melhor resultado, seguido do OMA e pôr fim do OMT, este último não conseguiu manter um filme de lubrificação até o final do ensaio, apresentando falha (adesão do pino com o disco).

Palavras-chaves — Tribômetro; Atrito; Biolubrificantes; Incertezas de medição.

ABSTRACT

Lubrication is essential as a tool for friction control. Therefore, having an equipment that can acquire lubrication test data more accurately is important. The equipment that the Tribology Laboratory (LATRIB) at the Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS) possesses for conducting friction coefficient measurement tests was not originally developed to evaluate low friction in lubricated contacts. Hence, this study aimed to develop a Load Cell Device (DCC) to accurately assess biolubricants' friction coefficients. Using the Kleine and McClintock equation, the maximum error of the acquisition methods was compared, with DCC showing an improvement of $\pm 12.6\%$ when compared to the reading and data acquisition system of the pin-on-disk (PoD) tribometer. It is worth noting that the test conditions to generate the maximum error in both acquisition systems are extremely specific and rarely used. Both data readout and acquisition systems were compared in a test that evaluated the friction coefficient of three biolubricants: castor oil (OM) and its aminolyzed (OMA) and transesterified (OMT) versions. The test results show that the load cell device produces outcomes compatible with the original PoD's data acquisition and control system. Regarding the behavior of biolubricants during the test, the castor oil base, OM, showed the best result, followed by OMA and finally OMT, which failed to maintain a lubrication film throughout the test, leading to adhesive failure between the pin and the disc.

Keywords — Tribometer; Friction; Biolubricants; Measurement uncertainties.

1. INTRODUÇÃO

A importância dos óleos lubrificantes para a eficiência energética é notória, visto que possuem como característica principal a redução do atrito, sendo este o responsável por perdas de até 100 milhões de TeraJoules (TJ) anualmente em todo o mundo [1]. Desse modo, a utilização de óleos lubrificantes é imprescindível tanto para a indústria como na vida cotidiana [2]. No entanto, os óleos lubrificantes usados em escala industrial são do tipo mineral derivados do petróleo, estes apesar de possuírem uma boa eficiência para a redução do atrito apresentam resíduos que ao serem lançados no meio ambiente, principalmente na água e no solo, acarretam danos ambientais que podem ser irreversíveis, causando grande impacto no meio ambiente e por consequência na sociedade [3],[4].

Uma alternativa para contornar o impacto do descarte de óleos minerais, mantendo a sua principal função de redução do atrito e por consequência ganho de eficiência energética, é a substituição deste tipo de lubrificante pelo uso de óleos biolubrificantes [3], visto que um biolubrificante é um lubrificante biodegradável que tem a capacidade comprovada de ser decomposto em um intervalo de até 1 ano, por meio de processos biológicos naturais em terra carbonácea, água ou dióxido de carbono [5]. Tendo esse preceito em mente, o Laboratório de Tribologia (LATRIB) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) realizou ensaios tribológicos para qualificar os biolubrificantes, desenvolvidos pelo Laboratório de Polímeros e Síntese Orgânica (SINPOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Atualmente, o Laboratório de Tribologia (LATRIB) possui um tribômetro do tipo pino-sobre-disco, desenvolvido por Neis, 2012 [6], para ensaios de contato à seco, como testes de materiais de fricção e contatos metal-metal, ou seja, ensaios com alto atrito. Dessa maneira, para medição do atrito de superfícies lubrificadas foi necessário desenvolver um dispositivo auxiliar ao tribômetro para a realização dos ensaios tribológicos dos biolubrificantes, tendo esse dispositivo elevada precisão de medição do coeficiente de atrito, uma vez que a leitura das forças normais e de atrito são medidas diretamente no corpo de prova.

2. CONFIGURAÇÕES DO EQUIPAMENTO E METODOLOGIA APLICADA

O equipamento utilizado foi o tribômetro do tipo pino-sobre-disco desenvolvido por Neis, 2012 [6]. Como já comentado, esse equipamento foi originalmente desenvolvido para simular ensaios de contatos à seco, como ensaios de frenagens, ou seja, condição de alta carga e alto atrito em contato seco, tendo a medição do coeficiente de atrito dada pela equação 1. Um esquema deste tribômetro é mostrado na Figura 1.

$$\mu = \frac{T}{F_N \cdot R} \quad (1)$$

onde μ é o coeficiente de atrito [adimensional], T é o torque de reação no eixo [Nm], F_N é a força normal [N] e R é o raio de deslizamento do contato [m].

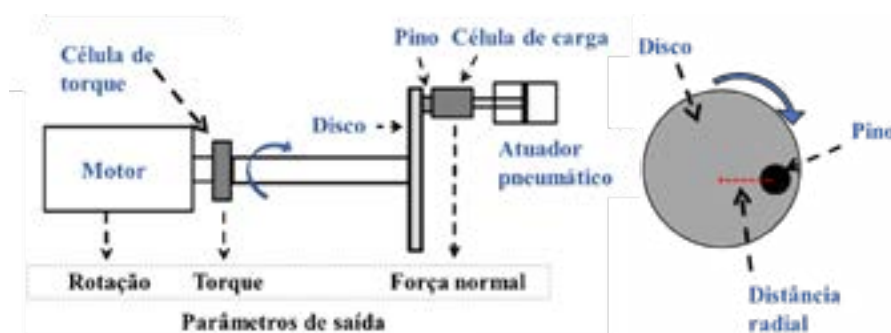


Figura 1. Esquema do tribômetro pino-sobre-disco. Adaptado de [7].

Conforme pode-se observar na equação 1, o coeficiente de atrito é obtido de maneira indireta, pois depende do torque no eixo. Além disso, devido a dependência do torque no eixo é necessário considerar o atrito interno do mancal, e a incerteza referente a medição do raio de deslizamento na incerteza relativa à medição do coeficiente de atrito. Devido a isso, os resultados apresentam no pior caso, isto é, uma baixa força normal e um alto atrito, um erro percentual de $\pm 23,6\%$, quando aplicado uma força normal de 40 N e torque frenante de atrito igual a 1 Nm, conforme estudo publicado pelo mesmo grupo de pesquisa [7]. É importante destacar que as condições de baixa força normal e alta força de atrito, que representam a situação de maior erro, são incomuns e dificilmente ocorrem em algum ensaio tribológico. A posteriori será demonstrado que o novo dispositivo foi desenvolvido para medir o coeficiente de atrito de maneira direta, e assim, diminuir o erro da sua medição.

O novo dispositivo auxiliar ao tribômetro utiliza células de carga, transdutores de força para medir as forças normal e de atrito, conforme mostrado na Figura 2. Este dispositivo com células de carga (DCC) é acoplado no carro movimentado pelo atuador pneumático, o qual aplica a força normal. Dessa forma, uma das células está posicionada de forma a realizar a leitura da força aplicada, força normal, enquanto que a outra célula de carga está orientada de maneira a realizar a leitura de esforços na vertical do contato, ou seja, a força de atrito. Nessa segunda célula, que realiza a leitura do atrito, é onde o pino está fixado. A célula de carga que realiza a leitura da força normal possui fundo de escala de 500 N, e a célula que realiza a leitura da força de atrito possui fundo de escala de 400N, ambas as células de carga possuem sensibilidade de 2 mV/V. Os cálculos de incertezas de medição deste novo dispositivo são apresentados no tópico 3.

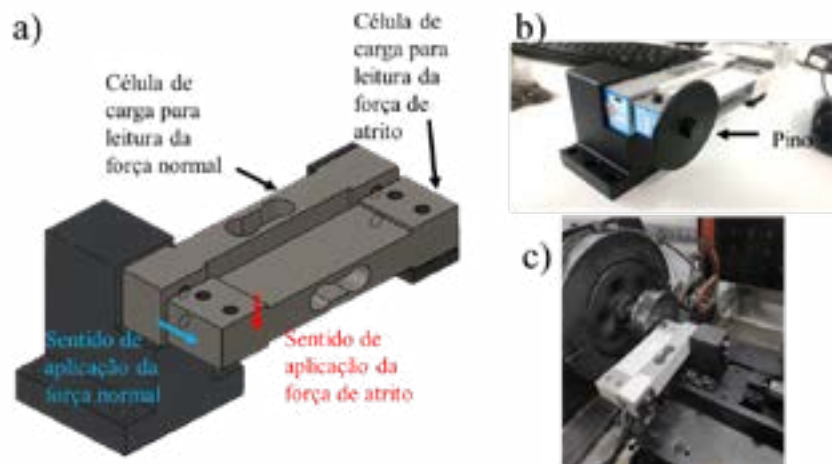


Figura 2. Dispositivo com células de carga (DCC), em (a) uma representação do dispositivo e do seu funcionamento, em (b) o dispositivo depois de elaborado e (c) o dispositivo montado no tribômetro PoD.

Como forma de comparação entre as duas formas de aquisição de dados, foram testados 3 diferentes biolubrificantes à base de mamona. Um é o próprio óleo base de mamona (OM), e os outros dois são versões aminolisada (OMA) e transesterificada (OMT) do mesmo. A estrutura molecular dos óleos é apresentada na Figura 3, a esquerda é possível visualizar a estrutura de triglicerídeo do OM, que é alterada pelas reações de transesterificação e aminólise. Ambas as reações químicas resultam na quebra da estrutura do triglicerídeo, separando o glicerídeo das cadeias de ácido graxo. Essas cadeias ligam-se então aos componentes fornecidos na reação, provenientes do álcool (transesterificação) e da dietanolamina (aminólise). O objetivo destas alterações químicas é promover uma melhora na estabilidade térmica e oxidativa do óleo [8].

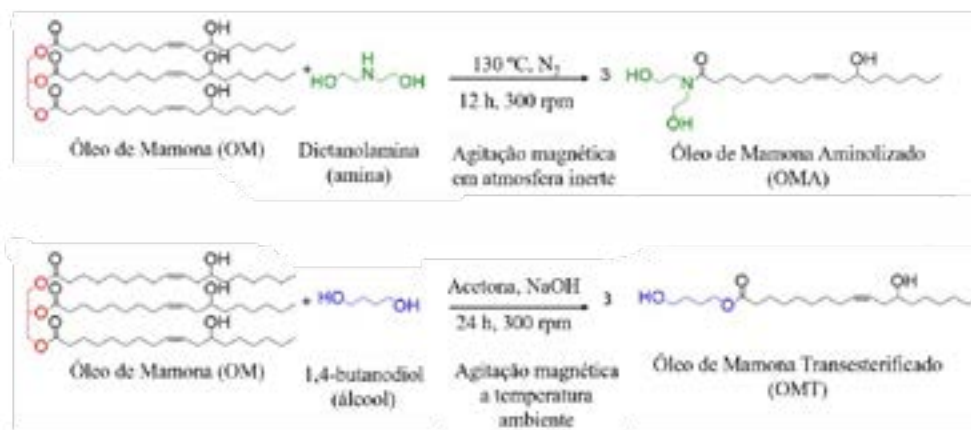


Figura 3. Esquema do processo de aminolisação e transesterificação de um óleo de mamona. Adaptado de [9].

Os parâmetros utilizados no teste estão resumidos na Tabela 1. Tanto a força normal de 200 N quanto a velocidade de deslizamento de 0,5 m/s foram mantidas constantes para diminuir a vibração, enquanto que o raio de deslizamento utilizado foi de 17,5 mm. Os pinos e discos são ambos de aço SAE52100 e as suas rugosidades quadráticas médias (R_q) foram mantidas em 0,27 μm . O pino possui um raio de 200 mm em sua ponta, gerando uma tensão de contato Hertziana de 156 MPa. As superfícies foram previamente limpas utilizando uma solução de 90% de xilol com 10% de álcool etílico. O lubrificante foi fornecido de maneira escassa, 0,2 ml na superfície do pino e 0,2 ml na superfície do disco, aplicado com o auxílio de uma seringa com graduações de 0,1 ml.

Tabela 1. Parâmetros de ensaio aplicados no teste comparativo entre as formas de aquisição de dados no tribômetro pino-sobre-disco.

Velocidade angular [rpm]	Raio de deslizeamento [mm]	Velocidade de deslizeamento [m/s]	Força normal [N]	Tensão de contato Hertziana média [MPa]	Tempo de ensaio [s]	Forma de lubrificação
272	17,5	0,5	200	156	2700	0,2 mL no pino e 0,2 mL no disco

3. DETERMINAÇÃO DA PRECISÃO DO DISPOSITIVO

A incerteza de medição leva em consideração os equipamentos utilizados, sendo eles: 2 células de carga modelo SPL, uma com capacidade de 500 N utilizada para medir a força normal, e outra com capacidade de 100 N para medir a força de atrito, e para aquisição de dados foi utilizada uma placa de aquisição modelo ADS 1800 do fabricante Lynx®. Dos dados fornecidos pelos fabricantes, as células de carga possuem uma incerteza de 0,5% do fundo de escala, enquanto a placa de aquisição possui uma resolução de 24 bits, assim sua incerteza é igual à $FM/2^{23}$, onde FM é a faixa de grandeza medida e o número 2^{23} faz referência a sua resolução, tendo 1 bit reservado para o sinal da tensão de entrada.

Considerando as incertezas das células de carga e do sistema de aquisição e controle de dados, a incerteza de medição instrumental associada a medição das forças normal e de atrito pode ser expressa pela Equação 2.

$$U(G) = \sqrt{u^2(s) + u^2(sag)} \quad (2)$$

onde $U(G)$ é a incerteza de medição instrumental [unidades da grandeza medida G], $u(s)$ é a incerteza associada a célula de carga [unidades da grandeza medida G] e $u(sag)$ é a incerteza associada à capacidade de resolução do sistema de aquisição e controles de dados [unidades da grandeza medida G].

A partir das especificações técnicas dos instrumentos utilizados, da Equação 2 e considerando o fundo de escala de cada célula de carga, é possível calcular a incerteza de medição instrumental da força normal e da força de atrito, que valem, respectivamente, $\pm 2,5$ N e $\pm 2,0$ N.

Para o cálculo da incerteza do coeficiente de atrito utiliza-se a Equação 3, de Kleine e McClintock [10], que leva em consideração as incertezas independentes, primeiro termo da equação, e as incertezas dependentes, segundo termo da equação.

$$U^2(f) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i) u(x_j) r(x_i, x_j) \quad (3)$$

onde f é uma função $f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, são as grandezas de entrada consideradas, $u(x_i)$ e $u(x_j)$ são as incertezas associadas as grandezas de entrada e $r(x_i, x_j)$ é o coeficiente de correlação entre as grandezas de entrada x_i e x_j .

Para a resolução da equação de Kleine e McClintock se fez necessário a equação do coeficiente de atrito, Equação 4.

$$\mu = \frac{F_{at}}{F_N} \quad (4)$$

onde μ representa o coeficiente de atrito, F_{at} é a força de atrito [N] e F_N a força normal [N].

Aplicando, a equação do coeficiente de atrito, Equação 4, e as incertezas das forças normal e de atrito na equação de Kleine e McClintock, é possível resolver as equações diferenciais parciais que compõe esta equação, e com isso obtém-se a Equação 5.

$$U(\mu) = \sqrt{\frac{6,25F_{at}^2}{F_N^4} + \frac{1}{4F_N^2} - \frac{5F_{at}}{2F_N^3}} \quad (5)$$

onde $U(\mu)$ representa a incerteza de medição do coeficiente de atrito, unidimensional.

Aplicando valores de forças normal e de atrito na Equação 5 obtém-se o erro de medição do coeficiente de atrito. Desse modo, chega-se à conclusão de que considerando forças baixas, e considerando que o maior atrito possível é igual a 2, atrito adesivo, se encontraria o maior erro de $\pm 11\%$ para a medição do coeficiente de atrito. Convém notar que a incerteza de medição do coeficiente de atrito, $U(\mu)$, dependerá das forças normal e de atrito. Assim, comparando o maior erro (pior caso) do DCC ($\pm 11\%$) com o pior caso do sistema original do tribômetro ($\pm 23,6\%$) obtemos uma melhora de 12,6%.

4. RESULTADOS DO TESTE COMPARATIVO ENTRE AS FORMAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Foram realizados ensaios para medir o coeficiente de atrito de 3 biolubrificantes, OM, OMA e OMT, para verificar o funcionamento do dispositivo e averiguar a melhora na sensibilidade. A Figura 4 apresenta os gráficos dos perfis de atrito lidos ao longo dos testes com cada um dos biolubrificantes.

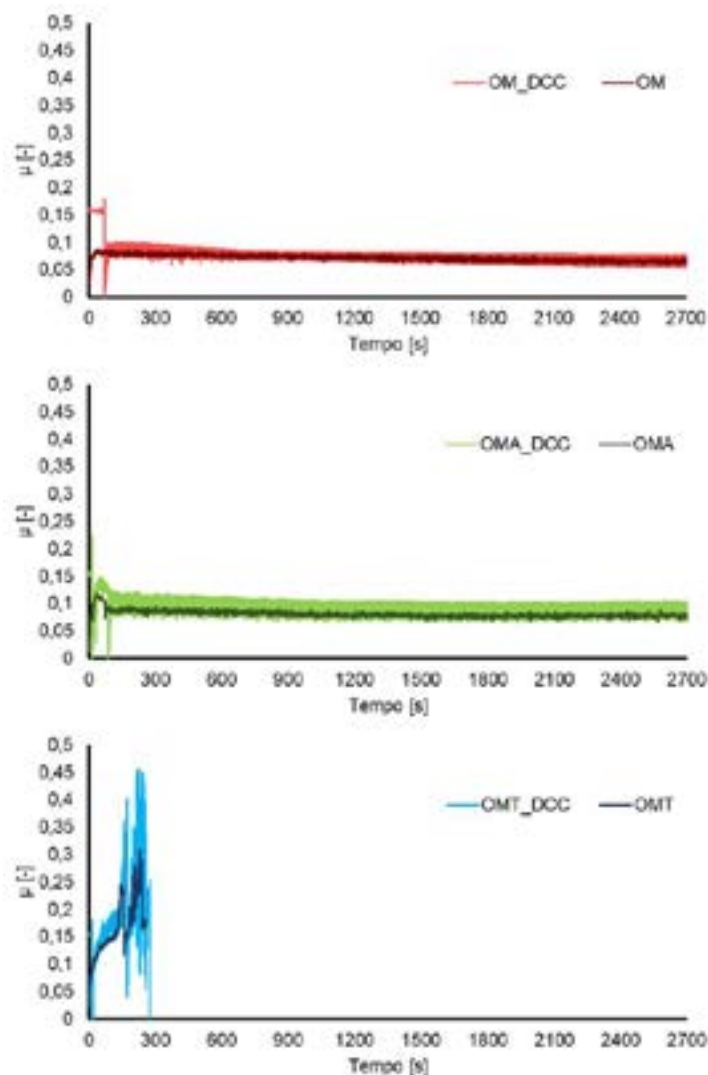


Figura 4. Gráficos comparando os perfis de atrito adquiridos pelos dois sistemas de aquisição, o sistema nativo do tribômetro e o dispositivo de células de carga (DCC), para os testes com cada um dos três óleos.

Ao avaliar os perfis de atrito resultantes quanto ao desempenho dos biolubrificantes, logo percebe-

se que o óleo OMT possui o pior desempenho, uma vez que o mesmo não conseguiu suportar todo o tempo do ensaio, apresentando uma falha no filme de lubrificante logo no início do teste (antes de 300 segundos). Esta falha no filme lubrificante permitiu o contato entre as superfícies metálicas, o que devido a afinidade química entre o par tribológico, ambos de mesmo material, acarretou em um atrito adesivo. Além disso, observa-se que as leituras do dispositivo DCC apresentam uma maior amplitude e mudanças, subidas e descidas no perfil do coeficiente de atrito, o que demonstra a sua maior sensibilidade, de forma que, considerando a capacidade da célula de carga, mesmo as menores forças de atrito são lidas.

A Tabela 2 mostra os valores médios do coeficiente de atrito. Considerando somente o valor do coeficiente de atrito médio, novamente nota-se que o biolubrificante OMT é inferior aos demais, enquanto que o OM se apresentou o menor coeficiente de atrito seguido pelo OMA. Considerando o desvio padrão não é possível afirmar que o OM é superior ao OMA. Como pode ser visto na Tabela 2 o desvio padrão é maior para o DCC, devido ao fato do perfil do coeficiente de atrito ter uma maior amplitude.

Tabela 2. Coeficientes de atrito médios para os testes com cada um dos três biolubrificantes.

Sistema de aquisição	Lubrificante		
	OM	OMA	OMT
Original do tribômetro	0,0719±0,0057	0,0811±0,0067	0,1633±0,0509
Dispositivo com células de carga	0,0755±0,0158	0,0967±0,0116	0,1904±0,0743

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho buscou desenvolver um novo dispositivo utilizando células de carga (DCC) para melhorar a precisão de leitura e aquisição de dados de ensaios lubrificados (baixo atrito) do tribômetro do Laboratório de Tribologia da UFRGS, as principais conclusões deste estudo são:

O dispositivo desenvolvido é uma ferramenta eficiente para a leitura e aquisição de dados em ensaios lubrificados, uma vez que ele elimina o erro referente a medição do torque e o erro de medição referente ao raio de deslizamento, devido a sua medição do coeficiente de atrito de forma direta no corpo de prova. Comparando as maiores incertezas do novo dispositivo com as maiores incertezas do sistema original do tribômetro conseguiu-se um ganho de precisão de 12,6% na medição do coeficiente de atrito nos ensaios dos biolubrificantes.

Os biolubrificantes à base de mamona apresentaram boa capacidade de lubrificação no geral, mantendo o atrito em valores baixos. O óleo base de mamona (OM) e a sua versão aminolisada (OMA) se destacaram do óleo de mamona transesterificado (OMT) por conseguirem manter o filme lubrificante até o final do tempo de ensaio.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio das agências de pesquisa brasileiras CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Código de Financiamento 001).

Referencias

- [1] HOLMBERG K.; ERDEMIR A. Impacto global da fricção no consumo de energia, economia e meio ambiente, transações FME (2015).
- [2] G.W. STACHOWIAK, A.W. BATCHELOR, Engineering Tribology (Third Edition), Butterworth-Heinemann, 2006, ISBN 9780750678360, <https://doi.org/10.1016/B978-075067836-0/50001-8>.
- [3] J. MCNUTT, Q. S. HE, Development of biolubricants from vegetable oils via chemical modification, Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Volume 36, 2016, Pages 1-12, ISSN 1226-086X, <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.02.008>.
- [4] ZULKIFLI, N.W.M. et al. Lubricity of bio-based lubricant derived from different chemically modified fatty acid methyl ester, Tribology International, Volume 93, Part B, 2016, Pages 555-562, ISSN 0301-679X, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.03.024>.

- [5] STARLING, M. F. R. Desenvolvimento de biolubrificantes a partir dos óleos de pinhão-manso, macaúba e mamona, Master Dissertation (In Portuguese), Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil, 2016.
- [6] NEIS, P.D. Development of a Multifunctional Tribometer with Independent Temperature Control of the Brake Disk (Doctoral dissertation, Ghent University), 2012.
- [7] PAVLAK, R. et al. Wear, Friction and NVH Characterization Using a Laboratory-Scale Tribometer, SAE Technical Paper 2017-36-0003, 2017, <https://doi.org/10.4271/2017-36-0003>.
- [8] RIOS, Í.C. et al. Chemical modification of castor oil fatty acids (*Ricinus communis*) for biolubricant applications: An alternative for Brazil's green market. *Industrial Crops and Products*, vol. 145, ed. November 2019, p.112000. 2020.
- [9] STRADOLINI, P. Modificação dos óleos de mamona e de soja epoxidado para aplicação em biolubrificantes (in Portuguese), Master dissertation, Federal University of Rio Grande do Sul (Brazil), 2022.
- [10] KLEINE, S. J. AND MCCLINTOCK, F. A. Describe uncertainties in single sample experiments. *Mechanical engineering*, 75, 3–8, 1953.