

# Engenharias em perspectiva

ciência, tecnologia e inovação

# 2

Mariana Natale Fiorelli Fabiche  
Aline Naiara Zito  
(Organizadoras)

# Engenharias em perspectiva

ciência, tecnologia e inovação

# 2

Mariana Natale Fiorelli Fabiche  
Aline Naiara Zito  
(Organizadoras)

**Editora chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Editora executiva**

Natalia Oliveira

**Assistente editorial**

Flávia Roberta Barão

**Bibliotecária**

Janaina Ramos

**Projeto gráfico**

Ellen Andressa Kubisty

Luiza Alves Batista

Nataly Evilin Gayde

Thamires Camili Gayde

**Imagens da capa**

iStock

**Edição de arte**

Luiza Alves Batista

2024 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2024 Os autores

Copyright da edição © 2024 Atena

Editora

Direitos para esta edição cedidos à

Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena

Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

**Conselho Editorial**

**Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Colégio Militar Dr. José Aluisio da Silva Luz / Colégio Santa Cruz de Araguaia/TO

Profª Drª Cristina Aledi Felseburgh – Universidade Federal do Oeste do Pará

Prof. Dr. Diogo Peixoto Cordova – Universidade Federal do Pampa, Campus Caçapava do Sul

Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia

Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará

Prof. Dr. Fabrício Moraes de Almeida – Universidade Federal de Rondônia

Profª Drª Glécilla Colombelli de Souza Nunes – Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Hauster Maximiler Campos de Paula – Universidade Federal de Viçosa

Profª Drª Iara Margolis Ribeiro – Universidade Federal de Pernambuco

Profª Drª Jéssica Barbosa da Silva do Nascimento – Universidade Estadual de Santa Cruz

Profª Drª Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense

Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. Leonardo França da Silva – Universidade Federal de Viçosa

Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Marcos Vinicius Winckler Caldeira – Universidade Federal do Espírito Santo

Profª Drª Maria Iaponeide Fernandes Macêdo – Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Profª Drª Maria José de Holanda Leite – Universidade Federal de Alagoas

Profª Drª Mariana Natale Fiorelli Fabiche – Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Prof. Dr. Milson dos Santos Barbosa – Universidade Tiradentes

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Nilzo Ivo Ladwig – Universidade do Extremo Sul Catarinense

Profª Drª Priscila Natasha Kinas – Universidade do Estado de Santa Catarina

Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Rafael Pacheco dos Santos – Universidade do Estado de Santa Catarina

Prof. Dr. Ramiro Picoli Nippes – Universidade Estadual de Maringá

Profª Drª Regina Célia da Silva Barros Allil – Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí

Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Engenharias em perspectiva: ciência tecnologia e inovação 2

**Diagramação:** Ellen Addressa Kubisty  
**Correção:** Maiara Ferreira  
**Indexação:** Amanda Kelly da Costa Veiga  
**Revisão:** Os autores  
**Organizadoras:** Aline Naiara Zito  
Mariana Natale Fiorelli Fabiche

<b>Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)</b>	
E57	<p>Engenharias em perspectiva: ciência tecnologia e inovação  2 / Organizadoras Aline Naiara Zito, Mariana Natale  Fiorelli Fabiche. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2024.</p> <p>Formato: PDF  Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader  Modo de acesso: World Wide Web  Inclui bibliografia  ISBN 978-65-258-2626-4  DOI: <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.264241807">https://doi.org/10.22533/at.ed.264241807</a></p> <p>1. Engenharia. 2. Tecnologia. I. Zito, Aline Naiara  (Organizadora). II. Fabiche, Mariana Natale Fiorelli  (Organizadora). III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDD 620</p>
<b>Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166</b>	

**Atena Editora**  
Ponta Grossa – Paraná – Brasil  
Telefone: +55 (42) 3323-5493  
[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
contato@atenaeditora.com.br

## DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

## DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

Bem-Vindo amigo leitor, é com grande entusiasmo e dedicação que apresentamos a vocês a segunda coleção “Engenharias em perspectiva: ciência tecnologia e inovação 2”.

Com uma coleção diversificada e contemporânea, a obra aborda diversos trabalhos científicos de grande importância desenvolvidos na área da Engenharia, com enfoque na ciência, na tecnologia e nas inovações.

Essa obra é composta por dezesseis capítulos categorizados e interdisciplinares que dissertam sobre diversos assuntos tratados na atualidade.

Nessa obra encontra-se diversos assuntos, sendo: uma análise de concentração de ions metálicos em matrizes provenientes de ETES; aplicação da ontologia e inteligência artificial; estudos de argamassas auto-adensáveis com elevados teores de materiais cimentícios; fabricação de peças metálicas por manufatura aditiva; inundações urbanas; modelagem e simulação da pirólise de biomassa em reator de leito fluidizado; futuro da robótica; produção de sabão em aulas de química no ensino médio; dentre diversos outros assuntos pertinentes no ramo da engenharia.

Com uma coleção de abordagem fácil e objetiva, a obra busca incentivar a divulgação de novos trabalhos científicos no meio acadêmico e profissional. Ressalta ainda a importância dos autores e pesquisadores de escolherem e divulgarem seus trabalhos por meio de plataformas confiáveis, como a Atena Editora.

Aos autores, agradecemos pela confiança e espírito de parceria.

Aos leitores desejamos uma ótima leitura.

Aline Naiara Zito  
Mariana Natale Fiorelli Fabiche

**CAPÍTULO 1 ..... 1**

ANÁLISE DA CONCENTRAÇÃO DE ÍONS METÁLICOS EM MATRIZES  
PROVENIENTES DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTE (ETE) E  
DO LAGO DE ITAIPU, NO OESTE DO PARANÁ

Liana Fabris  
Rubia Camila Ronqui Bottini  
Adelmo Lowe Pletsch

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2642418071>

**CAPÍTULO 2 ..... 12**

APLICAÇÕES DA ONTOLOGIA E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (IA) NA  
ENGENHARIA BIOMÉDICA: UMA ANÁLISE ABRANGENTE

Henderson Matsuura Sanches

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2642418072>

**CAPÍTULO 3 ..... 17**

DESARROLLOS PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

Luis Rodrigo Palomera Rodríguez  
José Guadalupe Ramírez Vieyra

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2642418073>

**CAPÍTULO 4 ..... 35**

EFFECTS OF CO<sub>2</sub> PENETRATION ON THE PROPERTIES OF SELF-  
COMPACTING MORTARS WITH HIGH CONTENTS OF SUPPLEMENTARY  
CEMENTITIOUS MATERIALS

Aretuza Karla Araújo da Rocha  
Hugo Alessandro Almeida Diniz  
Anne Raquel da Costa Araujo  
Ruan Landolfo da Silva Ferreira  
Marcos Alyssandro Soares dos Anjos  
Normando Perazzo Barbosa

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2642418074>

**CAPÍTULO 5 ..... 52**

FABRICAÇÃO DE PEÇAS METÁLICAS POR MANUFATURA ADITIVA EM  
AÇOS COM BAIXO TEOR DE CARBONO

Henrique Cechinel Casagrande  
Anderson Daleffe  
Carlos Antônio Ferreira  
Daniel Fritzen  
Gilson De March  
Jovani Castelan  
Lirio Schaeffer

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2642418075>

**CAPÍTULO 6 .....63****INUNDAÇÕES URBANAS: UM ESTUDO DE CASO EM SWMM NA LAGOA DO SAPO EM BATAYPORÃ - MS**

Guilherme Mendes dos Santos

Ricardo Schettini Figueiredo

Lucas Mariano Medeiros

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2642418076>**CAPÍTULO 7 .....77****INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DE TERMOSSIFÕES CONTENDO NANOFUIDO DE ÓXIDO DE GRAFENO APLICADOS NO RESFRIAMENTO DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS**

Humberto Ianczkovski

Allefe Jardel Chagas Vaz

Victor Vaurek Dimbarre

Rozane de Fátima Turchiello Gómez

Thiago Antonini Alves

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2642418077>**CAPÍTULO 8 .....97****MICROSTRUCTURE AND PLASTIC FLOW OF DUPLEX STAINLESS STEEL IN HOT TORSION TEST**

Jean Robert Pereira Rodrigues

Antônio Santos Araujo Júnior

José Roberto Pereira Rodrigues

Wellinton de Assunção

Fernando Lima de Oliveira

Moisés dos Santos Rocha

Sebastião Raimundo de Jesus Belém Leitão Filho

Fabio Alejandro Carvajal Florez

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2642418078>**CAPÍTULO 9 ..... 107****MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA PIRÓLISE DE BIOMASSA EM REATOR DE LEITO FLUIDIZADO**

Alysson Dantas Ferreira

Suzana Dantas

Severino Rodrigues de Farias Neto

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2642418079>**CAPÍTULO 10..... 124****MODELING, SIMULATION AND CONTROL OF SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER OF BRAZILIAN PRE-SAL FPSO**

José Andersands Flauzino Chaves

Gabriel Francisco da Silva

Rosivânia da Paixão Silva Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.26424180710>

**CAPÍTULO 11 ..... 133****MULHERES NO ÂMBITO NUCLEAR IMPULSIONANDO A INTEGRAÇÃO LATINO-AMERICANA**

Nélida Lucia del Mastro

Juana Luisa Gervasoni

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.26424180711>**CAPÍTULO 12..... 145****O FUTURO DA ROBÓTICA: AVANÇOS E PERSPECTIVAS NA ROBÓTICA COGNITIVA PARA A PRÓXIMA DÉCADA**

Márcio Mendonça

Marcos Banheti Rabello Vallim

Michelle Eliza Casagrande Rocha

Fabio Nogueira de Queiroz

Marcio Jacometti

Wagner Fontes Godoy

Francisco de Assis Scannavino Junior

Gustavo Henrique Bazan

Henrique Cavalieri Agonilha

Andressa Haiduk

Angelo Feracin Neto

Vera Adriana Azevedo Hypolito

Carlos Alberto Paschoalino

Pedro Henrique Calegari

Roberto Bondarik

Vicente de Lima Gongora

Luiz Francisco Sanches Buzzacchero

Eduardo Filgueiras Damasceno

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.26424180712>**CAPÍTULO 13..... 159****PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO DE APOIO À HEMODIÁLISE**

João Pedro Uglione Da Ros

Patrícia Magnago

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.26424180713>**CAPÍTULO 14..... 183****EXERCÍCIOS RESOLVIDOS SOBRE INDUTOR DE CORRENTE ALTERNADA**

Filomena Barbosa Rodrigues Mendes

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.26424180714>**CAPÍTULO 15..... 195****UNMANNED AERIAL VEHICLES BASED 3D CITY MODELING DATA COLLECTION, PROCESSING AND ANALYSIS THE CASE OF YAVUZ SINAN NEIGHBORHOOD**

Abdalahman T. Y. Alashi

Özhan Ertekin

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.26424180715>

**CAPÍTULO 16.....223**

**USO DO ÓLEO DE COCOS NUCIFERA PARA PRODUÇÃO DE SABÃO EM AULAS DE QUÍMICA NO ENSINO MÉDIO**

Maria Paula Rodrigues da Silva Evangelista

Thais Malcher dos Santos Costa

Fabiano Lins da Silva

Mônica Regina da Costa Marques Calderari

Elizabeth Teixeira de Souza

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.26424180716>

**SOBRE AS ORGANIZADORAS .....234**

**ÍNDICE REMISSIVO .....235**

## ANÁLISE DA CONCENTRAÇÃO DE ÍONS METÁLICOS EM MATRIZES PROVENIENTES DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTE (ETE) E DO LAGO DE ITAIPU, NO OESTE DO PARANÁ

*Data de submissão: 24/05/2024*

*Data de aceite: 01/07/2024*

### **Liana Fabris**

Universidade Tecnológica Federal do  
Paraná Curitiba – Paraná  
<http://lattes.cnpq.br/2441559614641446>

### **Rubia Camila Ronqui Bottini**

Universidade Tecnológica Federal do  
Paraná Curitiba – Paraná  
<http://lattes.cnpq.br/9116853548372190>

### **Adelmo Lowe Pletsch**

Universidade Tecnológica Federal do  
Paraná Curitiba – Paraná  
<http://lattes.cnpq.br/1731491755917260>

**RESUMO:** Os ecossistemas desempenham um papel vital na manutenção do equilíbrio ambiental, mas as atividades humanas têm aumentado a liberação de poluentes, incluindo metais pesados, comprometendo a qualidade do solo e da água. O monitoramento desses metais em corpos hídricos é essencial para avaliar a contaminação e garantir a saúde ambiental. No Brasil, regulamentações como as resoluções CONAMA 420/2009, 454/2012 e 430/2011 orientam o gerenciamento de áreas contaminadas, materiais de dragagem e lançamento de efluentes, respectivamente. Assim, o objetivo da pesquisa foi determinar

o teor de metais em amostras de sedimento e lodo de esgoto, coletados no município de Santa Helena, no oeste do estado do Paraná. Foram determinados os parâmetros físicos e químicos, conforme Manual da Embrapa e os teores pseudo-totais de metais segundo o método EPA 3051 A. A validação metodológica foi realizada através do Material de Referência Certificado (CRM049-50G). Os teores de íons metálicos nas amostras de lodo ficaram próximos aos encontrados na literatura para a região. Com relação aos sedimentos, os teores de metais pseudo-totais dos íons metálicos Cu, Cr, Fe, Ni, Pb e Zn estavam acima aos valores legislados pelo CONAMA 420/2009, indicando influência antropogênica. E, para as amostras de afluente e efluente, os teores de Cd, Ni e Pb nos efluentes estavam acima dos padrões legislados pela Resolução CONAMA 430/2011, com maior incremento ao Pb, indicando um grau de contaminação.

**PALAVRAS-CHAVE:** lodo; sedimento; afluente; efluente; metais.

## ANALYSIS OF METAL ION CONCENTRATION IN MATRICES FROM SEWAGE TREATMENT PLANT AND ITAIPU LAKE, IN WESTERN PARANÁ

**ABSTRACT:** Ecosystems are important for maintaining environmental balance, but human activities have increased the release of pollutants, including heavy metals, compromising soil and water quality. Monitoring these metals in water bodies is essential to assess contamination and ensure environmental health. In Brazil, regulations such as CONAMA resolutions 420/2009, 454/2012 and 430/2011 guide the management of contaminated areas, dredging materials and effluent discharge, respectively. Thus, the objective of the research was to determine the metal content in samples of sediment and sewage sludge, collected in the municipality of Santa Helena, in the west of the state of Paraná. The physical and chemical parameters were determined, according to the Embrapa Manual and the pseudo-total metal contents according to the EPA 3051 A method. Methodological validation was carried out using the Certified Reference Material (CRM049-50G). The metal ion contents in the sludge samples were close to those found in the literature for the region. Regarding the sediments, the pseudo-total metal contents of the metallic ions Cu, Cr, Fe, Ni, Pb and Zn were above the values legislated by CONAMA 420/2009, indicating anthropogenic influence. And, for the influent and effluent samples, the levels of Cd, Ni and Pb in the effluents were above the standards legislated by CONAMA Resolution 430/2011, with a greater increase in Pb, which suggests a high degree of contamination.

**KEYWORDS:** sludge; sediment; affluent; effluent; metals.

## INTRODUÇÃO

Os ecossistemas desempenham um papel fundamental na manutenção do equilíbrio ambiental e na provisão de serviços ecossistêmicos essenciais para a sobrevivência das espécies (Prado et al., 2022). No entanto, o aumento das atividades antropogênicas, como industrialização, urbanização descontrolada e práticas agrícolas intensivas, tem levado a uma crescente liberação de poluentes no ambiente, comprometendo a qualidade do solo, das águas superficiais e subterrâneas (Ferreira et al., 2021; Zhang et al., 2020). Entre esses poluentes, a contaminação por metais pesados emerge como uma preocupação significativa, dada a sua toxicidade e capacidade de acumulação na cadeia trófica (Naik et al., 2023).

O monitoramento do teor de íons metálicos nos corpos hídricos é realizado através da análise dos sedimentos, visto que estes desempenham um papel essencial no transporte de nutrientes e poluentes nos ecossistemas aquáticos (Zarfl, 2022). Essa abordagem possibilita avaliar o grau de contaminação enfrentado pelos organismos (Belo, 2010) e, conseqüentemente, entender seu impacto em toda a cadeia alimentar. Uma das maneiras de prevenir desequilíbrios nos corpos hídricos e diminuir problemas como odores desagradáveis e toxicidade (Reis, 2022), bem como diminuir a disponibilidade de metais pesados para o meio ambiente, ocorre por meio de um tratamento de efluente eficiente.

No Brasil, são estabelecidas regulamentações como a Resolução CONAMA 420/2009 e a Resolução CONAMA 454/2012, que direcionam o gerenciamento de áreas contaminadas e de materiais resultantes de dragagem, respectivamente (Brasil, 2009; Brasil, 2012). Paralelamente, nos Estados Unidos, entidades como a Agência de Proteção Ambiental (USEPA) e a Administração Oceânica e Atmosférica Nacional (NOAA) avaliam os sedimentos, empregando critérios de qualidade da água, níveis de toxicidade e bioacumulação (USEPA, 1991). Adicionalmente, no contexto brasileiro, a Resolução CONAMA nº 430/2011 regula as condições e padrões para o lançamento de efluentes em geral, especificamente abordando os efluentes provenientes de sistemas de tratamento de esgotos sanitários, ressaltando a importância de monitorar a qualidade desses lançamentos no ambiente (Brasil, 2011).

Considerando este contexto, este estudo teve como objetivo estudar a concentração de metais pseudo-totais em amostras de sedimento coletadas no Lago de Itaipu e em amostras de lodo de esgoto, afluente e efluente coletadas em uma estação de tratamento de efluentes domésticos, no oeste do estado do Paraná.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Área de estudo

O estudo foi realizado em uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) no município de Santa Helena (Figura 1), no oeste do Paraná, que segundo o IBGE (2022), possui 25.492 habitantes e área territorial de 754,701 km<sup>2</sup>.

No município o tratamento do esgoto doméstico era realizado por um sistema de lagoas aeróbicas e anaeróbicas, no entanto, a partir do ano de 2020 a ETE foi modernizada recebendo um sistema de tratamento de lodos ativados com Reatores Sequenciais em Batelada (SBR), no qual cada tanque possui capacidade máxima de 2282,9 m<sup>3</sup> (AEN, 2023). Para o tratamento do lodo, uma das antigas lagoas foi transformada em *wetlands*, no qual algumas plantas aquáticas, como por exemplo o papiro brasileiro, auxiliam no processo de mineralização do lodo, promovendo a depuração da matéria orgânica e de outros poluentes, o que faz com que o material aproxime as suas propriedades às do solo.

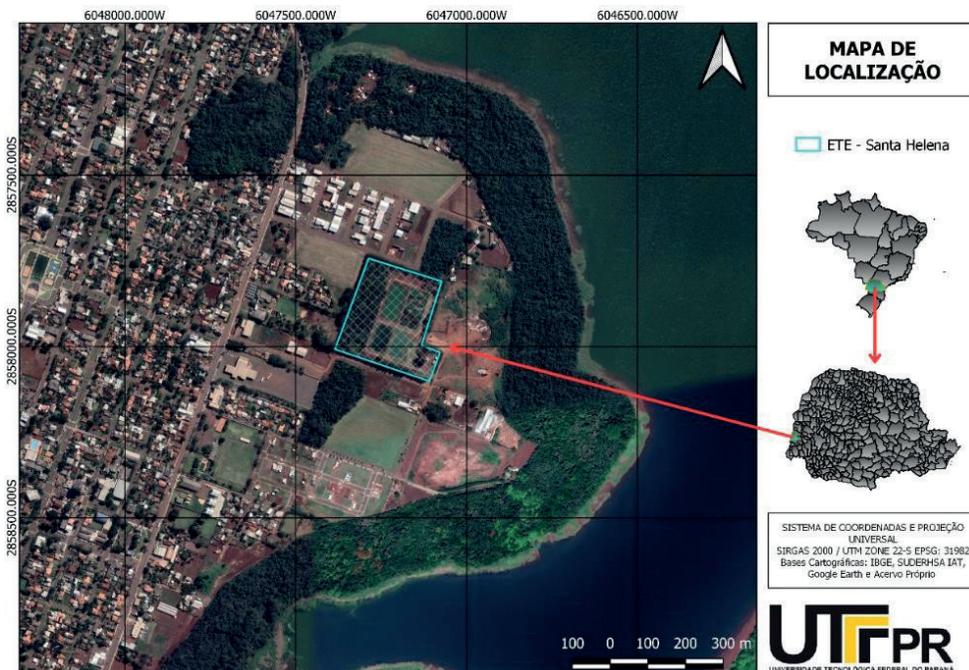


Figura 1 – ETE localizada em Santa Helena (PR)

Fonte: Google Earth - Modificado pelos autores (2023)

## Amostragem

As amostragens do lodo, afluente, efluente e do sedimento foram realizadas em dezembro de 2022. O lodo foi coletado em três pontos de uma estação de tratamento de efluentes (ETE) (Figura 2), as amostras de afluente e o efluente foram coletadas, respectivamente, na entrada e na saída do reator e as coletas de sedimento foram realizadas em dois pontos no lago de Itaipu, ambos localizados no município de Santa Helena, na região oeste do estado do Paraná. As amostras foram armazenadas em embalagens plásticas e posteriormente, em caixas térmicas e transportadas ao laboratório para as análises.



Figura 2 – Pontos de amostragem do lodo na ETE em Santa Helena (PR)

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Em laboratório, as amostras de lodo e sedimento foram depositadas em placas de Petri e secadas em estufa na temperatura de 60 °C. Na sequência, as amostras foram destorroadas com um almofariz e passadas na peneira de 2 mm. E, as amostras de afluente e efluente foram concentradas, com o auxílio de um rotaevaporador, tendo o volume reduzido de 500 mL para 100 mL, e na sequência foi adicionado 5 mL de ácido nítrico.

A Tabela 1 apresenta uma descrição detalhada do local de amostragem e as coordenadas geográficas.

Matriz	Potos	Local de amostragem	Coordenadas geográficas
Lodo	1	Calha Parshall	-24.855382, -54.322810
	2	Wetland	-24.855382, -54.322810
	3	Saída do reator	-24.855382, -54.322810
Sedimento	4	1000 m a jusante do lançamento da ETE	-24.847486, -54.323529
	5	5500 m a jusante do lançamento da ETE	-24.811666, 54.321001
Afluente e efluente	6	Entrada do reator	-24.855382, -54.322810
	7	Saída do reator	-24.855382, -54.322810

Tabela 1 - Descrição dos pontos de amostragem do lodo, sedimento, afluente e efluente

Fonte: Autoria própria (2024)

## Determinações físico-químicas e de metais pseudo-totais

As determinações físico-químicas - Matéria Orgânica (MO), ortofosfato e pH - das amostras de lodo e sedimento foram realizadas em duplicata e seguiram as metodologias apresentadas no Manual de Solos da Embrapa (EMBRAPA, 2017) e, Carbono Orgânico Total (COT) seguiu a metodologia de Kiehl (1985). E, as determinações de metais pseudo-totais seguiu o método da EPA 3051A (USEPA, 2007). A validação metodológica foi realizada a partir da análise do Material de Referência Certificado (CRM049-50G).

As determinações físico-químicas - alcalinidade, demanda química de oxigênio (DQO), nitrato, nitrito, sólidos suspensos, sólidos sedimentáveis e pH – foram determinados no próprio sistema de tratamento da ETE. E, as determinações de metais pseudo-totais foram realizadas seguindo o método EPA 3051 A, e a leituras realizadas em espectrofotômetro de absorção atômica (FAAS).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Determinações físico-químicas e de metais pseudo-totais

#### *Lodo de esgoto e sedimento*

A Tabela 2 apresenta os resultados de pH, ortofosfato, matéria orgânica, carbono orgânico total e teores pseudo-totais dos metais estudados nas matrizes de lodo e sedimento. Também são apresentados os valores de recuperação do Material de Referência Certificado (MRC), o qual apresentou alta variabilidade.

Os valores de pH nos pontos estudados indicam um caráter neutro, sendo o menor valor para o P1 (lodo referente à entrada da ETE). Os valores obtidos são semelhantes aos resultados obtidos por Lopes (2015). Um aumento de pH, segundo Fernandes e Souza (2001), indica que o lodo está em processo de mineralização, o que justifica uma maior acidez para o lodo bruto.

As concentrações de ortofosfato nas amostras de lodo e sedimento variaram entre 4,27 e 0,95 g. Ao comparar às concentrações obtidas nos pontos 1 e 3 da estação de tratamento de esgoto, nota-se que a taxa de remoção de fósforo foi de 63%.

O teor de MO variou de 70,08% a 6,94%. Enquanto o teor de COT variou de 38,94% a 3,86%. O valor de COT para o leito de secagem está próximo aos valores obtidos por Lopes (2015), que variou entre 27% a 31% e o valor obtido por Nogueira (2013), de 32,5%.

Metal	P1	P2	P3	P4	P5	MRC
pH	6,36	7,26	N.D.	7,57	7,01	-
Ortofosfato	4,27	1,65	1,60	1,82	0,95	-
MO	61,75	70,08	N.D.	7,48	6,94	-
COT	34,31	38,94	N.D.	4,15	3,86	-
Cd	0,24 ± 0,05	1,21 ± 0,07	0,79 ± 0,05	0,38 ± 0,01	0,80 ± 0,009	95,0 ± 1,17
Cr	51,34 ± 13,52	58,39 ± 1,38	69,24 ± 8,51	66,53 ± 1,88	55,55 ± 0,66	66,0 ± 1,10
Cu	72,37 ± 2,18	200,72 ± 2,56	356,83 ± 6,23	480,24 ± 10,83	188,16 ± 2,17	63,0 ± 0,45
Fe	14.748,46 ± 461,85	29.936,42 ± 1357,1	75.393,44 ± 1410,5	119.964,13 ± 8922,3	158.122,56 ± 33007,1	121,0 ± 151,28
Mn	14,43 ± 10,72	70,33 ± 19,05	68,17 ± 26,25	64,30 ± 2,31	52,70 ± 50,91	16,0 ± 2,35
Ni	213,29 ± 11,55	249,80 ± 0,61	250,82 ± 9,17	161,61 ± 0,68	159,68 ± 0,48	14,0 ± 1,30
Pb	17,41 ± 1,34	45,30 ± 0,49	28,05 ± 0,01	22,03 ± 0,37	21,40 ± 0,32	78,0 ± 0,75
Zn	344,49 ± 18,14	617,54 ± 51,04	428,25 ± 21,31	258,63 ± 6,85	336,59 ± 21,26	219,0 ± 14,26

N.D. – Não Determinado.

Tabela 2 - Resultados de pH, ortofosfato ( $\text{g kg}^{-1}$ ), MO e COT (%), metais ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) em lodo e sedimento dos pontos estudados e recuperação do MRC em (%).

Fonte: Autoria própria (2024)

No lodo os teores pseudo-totais dos metais, cádmio (0,24 a 1,21  $\text{mg kg}^{-1}$ ), cromo (51,34 a 69,24  $\text{mg kg}^{-1}$ ), cobre (72,37 a 356,83  $\text{mg kg}^{-1}$ ), ferro (14.748,46  $\text{mg kg}^{-1}$  a 75.393,44  $\text{mg kg}^{-1}$ ), manganês (14,43 a 70,33  $\text{mg kg}^{-1}$ ), níquel (213,29 a 250,82  $\text{mg kg}^{-1}$ ), chumbo (17,41 a 45,30  $\text{mg kg}^{-1}$ ) e zinco (344,49 a 617,54  $\text{mg kg}^{-1}$ ), apresentaram menor concentração no P1, entrada da ETE, especificamente coletado na calha Parshall.

As concentrações pseudo-totais dos metais encontradas no lodo da ETE estão abaixo dos valores reportados por Lopes (2015), na mesma região de estudo, exceto para o Ni. Quando comparados aos valores legislados pelo CONAMA 420/2009, que “dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas”, os teores encontram-se acima dos valores de prevenção, com maior incremento para Cu e Ni, os quais são passíveis de monitoramento visto que sugerem um elevado grau de contaminação, ao tratar que o lodo tem potencial uso agrícola.

Já para o sedimento coletado no lago de Itaipu as concentrações pseudo- totais dos metais mostraram pequenas variações, indicando características semelhantes entre

os pontos estudados. A variabilidade dos elementos ficou em: cádmio (0,38 a 0,80 mg kg<sup>-1</sup>); cromo (55,55 a 66,53 mg kg<sup>-1</sup>); cobre (188,16 a 480,24 mg kg<sup>-1</sup>); ferro (119.964,13 a 158.122,56 mg kg<sup>-1</sup>); manganês (52,70 a 64,30 mg kg<sup>-1</sup>); níquel (159,68 a 161,61 mg kg<sup>-1</sup>); chumbo (21,40 a 22,03 mg kg<sup>-1</sup>); e zinco (258,63 a 336,59 mg kg<sup>-1</sup>).

Os teores dos metais das amostras de sedimento, quando comparados aos valores de referências de qualidade para solos apresentados na literatura por Bocardi (2009), que serve como base para indicar contribuição antropogênica, apresentam um incremento para elementos Cr, Cu, Fe, Ni, Pb e Zn. Já os elementos Cd e Mn estão em teores inferiores aos de referência de qualidade dos solos da região. Quando comparados aos valores legislados para o Nível 2 pelo CONAMA 454/2012, que “estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional”, para sedimento de água doce, o Cd, Cr e o Pb estão de acordo com a legislação. Logo, os elementos Cu, Ni e Zn estão ligeiramente acima.

Já as concentrações do elemento Fe no sedimento ficaram abaixo do legislado pela EPA, que estabelece um teor de 220.000,00 mg kg<sup>-1</sup>, para os limites de efeitos aparentes, onde impactos biológicos são sempre esperados (USEPA, 1991).

#### *Afluente e efluente*

A Tabela 3 apresenta os resultados de pH, sólidos sedimentáveis, sólidos suspensos, alcalinidade e teores pseudo-totais dos metais estudados nas amostras de afluente e efluente da ETE.

Quando comparado aos valores estabelecidos pela Resolução CONAMA 430/2011, a qual “dispõe das condições e padrões para o lançamento de efluentes”, os parâmetros físico-químicos (pH, DQO, sólidos sedimentáveis, sólidos suspensos e alcalinidade) estão em conformidade com a legislação para o lançamento.

Metal	P6	P7
pH	7,28	6,80
DQO (mg L <sup>-1</sup> )	823,00	26,5
Sólidos sedimentáveis (mL L <sup>-1</sup> )	6,00	< 1,00
Sólidos suspensos (mg L <sup>-1</sup> )	312,50	6,00
Alcalinidade (mg L <sup>-1</sup> )	338,71	83,35
Cd	0,24	0,22
Cr	< LD	< LD
Cu	< LD	< LD
Fe	1,23	0,84
Mn	1,03	0,69
Ni	2,57	2,41
Pb	28,82	26,41
Zn	4,83	4,35

LD - Limite de Detecção

Tabela 3 - Resultados de pH, DBO (mg L<sup>-1</sup>), sólidos sedimentáveis (mL L<sup>-1</sup>), sólidos suspensos (mL L<sup>-1</sup>), alcalinidade (mL L<sup>-1</sup>) e metais (mg L<sup>-1</sup>) em afluente e efluente de ETE

Fonte: Autoria própria (2024)

Já as concentrações pseudo-totais dos metais nas amostras, sendo Cd (0,24 a 0,22), Fe (1,23 a 0,84), Mn (1,03 a 0,69), Ni (2,57 a 2,41), Pb (28,82 a 26,41) e Zn (4,83 a 4,35) apresentaram redução no teor do efluente com relação ao afluente, dos quais apenas os elementos Cd, Ni e Pb estão acima dos parâmetros estabelecidos pela Resolução CONAMA 430/2011, podendo ser sujeitos a monitoramento.

## CONCLUSÕES

Com base nas metodologias aplicadas, ambas se mostram com boa precisão. Quanto a validação metodológica realizada através da análise do MRC, visando avaliar a eficiência da recuperação dos metais estudados, obteve-se uma alta taxa de variação na concentração recuperada, oscilando de 14% para Ni a 219% do Zn.

Os parâmetros físico-químicos apresentaram valores próximos aos reportados na literatura para a região de estudo, para ambas as matrizes, lodo e sedimento. Para o ortofosfato o sistema de tratamento de lodo mostrou um rendimento na remoção de 63%, ficando próximo ao esperado para reatores em batelada, que é de 80%.

As concentrações de metais pseudo-totais na matriz do lodo ficaram próximas aos resultados reportados em outros estudos da região, exceto para o elemento Ni.

Para a matriz sedimento os teores de íons metálicos de Cu, Cr, Fe Ni, Pb e Zn, para os dois pontos de amostragem, ficaram acima dos valores de referência de estudos da região. Para o Nível 2 pelo CONAMA 454/2012, o Cd, Cr e o Pb estão de acordo com a legislação e os elementos Cu, Ni e Zn estão ligeiramente acima.

Com relação aos parâmetros físico-químicos para as amostras de efluente que serão lançados no corpo receptor (Lago de Itaipu), todos estão de acordo com a Resolução CONAMA 430/2011.

As concentrações de metais pseudo-totais para as amostras de efluente apresentaram reduções quando comparadas as amostras de afluente para todos os elementos que foi possível detectar. Sendo acima do padrão estabelecido pela CONAMA 430/2011, os teores de Cd, Ni e Pb.

## REFERÊNCIAS

AEN (Agência Estadual De Notícias Do Paraná). **Sanepar implanta solução baseada na natureza para tratar lodo de esgoto de Santa Helena.**

Disponível em: <https://www.aen.pr.gov.br/Noticia/Sanepar-implanta-solucao-baseada-na-natureza-para-tratar-lodo-de-egoto-de-Santa-Helena>. Acesso em: 7/05/2024.

BELO, A.; QUINÁIA, S. P.; PLETSCH, A. L. Avaliação da contaminação de metais em sedimentos superficiais das praias do lago de Itaipu. **Química nova**, v. 33, n. 3, p. 613–617, 2010.

BOCARDI, J. M. B. **Valores de referência de qualidade de metais, macroelementos e radionuclídeos em solos do oeste do Paraná.** Tese (Doutorado em Química) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, 2019

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº. 420, de 28 de dezembro de 2009.** Define critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Brasília, DF, 2009.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº. 430, de 13 de maio de 2011.** Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Brasília, DF, 2011.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº. 454, de 1 de novembro de 2012.** Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional. Brasília, DF, 2012.

EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solo.** 3. ed. 2017

FERNANDES, Fernando et al. Estabilização de lodo de esgoto. **Resíduos sólidos do saneamento: Processamento, reciclagem e disposição final**, v. 1, p. 32-57, 2001.

FERREIRA, N. K. F.; LIMA, C. F.; AZEVEDO, E. B. M.; MARINHO, A. F.;

ARAÚJO, F. O.; AZEVEDO, F. F. M. Disponibilidade de metais pesados e sua correlação com a matéria orgânica do solo em áreas produtoras de hortaliças na Região Metropolitana de Belém/PA. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 11, p. 109022–109032, 2021.

IBGE (Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística). **Censo Brasileiro de 2022 – Santa Helena (PR)**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/santa-helena/panorama>. Acesso em 07/05/2024.

KIEHL, E. J. **Fertilizantes Orgânicos**. São Paulo: Ceres, 1985.

LOPES, T. R. **Caracterização do esgoto sanitário e lodo proveniente de reator anaeróbio e de lagoas de estabilização para avaliação da eficiência na remoção de contaminantes**. Dissertação de Mestrado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015. 123 p.

NAIK, S.; PRADHAN, U.; KARTHIKEYAN, P.; BANDYOPADHYAY, D.; SAHOO, R. K.; PANDA, U. S.; MISHRA, P.; MURTHY, M. V. R. Ecological risk assessment of heavy metals in the coastal sediment in the South-western Bay of Bengal. **Frontiers in marine science**, v. 10, 2023.

NOGUEIRA, Thiago Assis Rodrigues et al. Short-term usage of sewage sludge as organic fertilizer to sugarcane in a tropical soil bears little threat of heavy metal contamination. **Journal of Environmental Management**, v.114, p.168- 177, 2013.

PRADO, R. B.; FIDALGO, E. C. C.; PARRON, L. M.; TURETTA, A. P. D.;

BALIEIRO, F.C. Oportunidades e desafios relacionados aos serviços ecossistêmicos de solo e água na paisagem rural. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 39, n. 2, p. 26955, 2022.

REIS, J. M. dos; AGUIAR, A. B. S.; FREITAS, G.; VASSOLER, V. C.; BARROS, G. V. L.; SANTOS, G. E.; RAMIREZ, I.; RODRIGUEZ, R. P. Metals removal techniques from wastewater: a literature review. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 2, p. e5251126100, 2022.

USEPA (United States Environmental Protection Agency). **Evaluation of Dredged Material Proposed for Ocean Disposal**. Testing Manual, 1991.

USEPA (United States Environmental Protection Agency). **Method 3051A**. Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils, 2007.

ZARFL, C.; DUNN, F. E. The delicate balance of river sediments. **Science (New York, N.Y.)**, v. 376, n. 6600, p. 1385–1386, 2022.

ZHANG, L.; MCKINLEY, J.; COOPER, M.; PENG, M.; WANG, Q.; SONG, Y.;

CHENG, H. A regional soil and river sediment geochemical study in Baoshan area, Yunnan province, southwest China. **Journal of geochemical exploration**, v. 217, n. 106557, p. 106557, 2020.

# APLICAÇÕES DA ONTOLOGIA E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (IA) NA ENGENHARIA BIOMÉDICA: UMA ANÁLISE ABRANGENTE

*Data de aceite: 01/07/2024*

**Henderson Matsuura Sanches**

Faculdade Brasília (FBr)

<https://orcid.org/0000-0003-2354-3393>

**RESUMO:** Este artigo examina o papel das ontologias e da inteligência artificial (IA) na Engenharia Biomédica, destacando sua importância na organização e integração de conhecimentos em áreas interdisciplinares. Uma ontologia é uma estrutura formal que representa conceitos, suas propriedades e as relações entre eles em um domínio específico, enquanto a IA oferece métodos computacionais para análise de dados complexos e tomada de decisões automatizadas. Na Engenharia Biomédica, as ontologias e a IA desempenham papéis complementares, facilitando a modelagem de dados, interoperabilidade de sistemas, tomada de decisões clínicas e desenvolvimento de tecnologias inovadoras. Este artigo revisa diversas aplicações dessas tecnologias na Engenharia Biomédica, destacando seus benefícios, desafios e tendências futuras.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ontologia, Inteligência Artificial, Engenharia Biomédica, Modelagem de Dados, Tomada de Decisões Clínicas.

**ABSTRACT:** This article examines the role of ontologies and artificial intelligence (AI) in Biomedical Engineering, highlighting their importance in organizing and integrating knowledge across interdisciplinary areas. An ontology is a formal structure that represents concepts, their properties, and the relationships between them in a specific domain, while AI provides computational methods for analyzing complex data and making automated decisions. In Biomedical Engineering, ontologies and AI play complementary roles, facilitating data modeling, system interoperability, clinical decision-making, and the development of innovative technologies. This article reviews various applications of these technologies in Biomedical Engineering, emphasizing their benefits, challenges, and future trends.

**KEYWORDS:** Ontology, Artificial Intelligence, Biomedical Engineering, Data Modeling, Clinical Decision Making.

## Introdução

A Engenharia Biomédica é uma área multidisciplinar que combina princípios da engenharia, ciências biológicas e medicina para desenvolver soluções inovadoras para problemas de saúde. No entanto, a integração e organização de informações complexas provenientes de diversas fontes e disciplinas representam um desafio significativo nesse campo. As ontologias surgem como uma ferramenta poderosa para enfrentar esses desafios, proporcionando uma estrutura formal para representar e organizar o conhecimento em Engenharia Biomédica.

O objetivo deste artigo é analisar as aplicações das ontologias e da inteligência artificial na Engenharia Biomédica, identificando seus principais usos, benefícios e desafios. Além disso, busca-se discutir tendências futuras e áreas de pesquisa promissoras nesse campo, visando contribuir para o avanço do conhecimento e o desenvolvimento de soluções inovadoras para problemas de saúde.

## DESENVOLVIMENTO

### O que é a Engenharia Biomédica?

Segundo a Sociedade Brasileira de Engenharia Biomédica (SBEB, 2024):

*“A Engenharia Biomédica (EB) é uma das sub área das engenharias que faz interface com a Grande Área da Saúde, especialmente a saúde humana, possuindo uma ampla gama de linhas de atuação.”*

A denominação Engenheiro Biomédico assim como suas atribuições foram definidas na Sessão Plenária Ordinária 1.347 do CONFEA – Decisão N°: PL-0034/2008, ocasião em que houve a inserção do título profissional ENGENHEIRO BIOMÉDICO na Tabela de Títulos Profissionais, instituída pela Resolução n° 473, de 26 de novembro de 2002. Em 26 de Julho de 2018, o Conselho Federal de Engenharia e Agronomia (CONFEA) publicou a Resolução n° 1.103, que discrimina as atividades e competências profissionais do Engenheiro Biomédico e convalida o respectivo título na Tabela de Títulos Profissionais do Sistema CONFEA/CREA.

Com a resolução quer dizer que os engenheiros biomédicos são os únicos habilitados ao desempenho de atividades profissionais no ambiente hospitalar? Não! Há uma série de outros engenheiros com atribuições profissionais no tocante a dispositivos, equipamentos e sistemas que existem no ambiente hospitalar e cujos outros profissionais estão habilitados a realizar essas atividades.

A Engenharia Clínica existe no país desde antes da criação dos cursos de graduação em EB, atualmente é considerada uma das sub áreas da Engenharia Biomédica como área do conhecimento, sendo esse entendimento internacional. Vem sendo exercida por profissionais de engenharia, especialmente após o advento dos cursos de especialização

em Engenharia Clínica, os quais proporcionam novas jornadas de aprendizagem e crescimento para os profissionais, principalmente para aqueles que não têm formação de graduação em EB e que desejam atuar no ambiente de saúde. Com a criação dos cursos de graduação em EB, a área de Engenharia Clínica vem sendo ocupada prioritariamente pelos Engenheiros Biomédicos.

## O que é Ontologia?

Segundo o *site* do Seminário de Pesquisas em Ontologias do Brasil (ONTOBRAS, 2024):

*“Ontologia é um campo interdisciplinar que estuda conceitos e teorias que dão embasamento para a construção de conceitualizações compartilhadas de domínios específicos. Em anos recentes, notamos um crescimento no interesse pela aplicação de ontologias para a solução de problemas de modelagem e classificação em diversas áreas como: Ciência da Computação, Ciência da Informação, Filosofia, Inteligência Artificial, Linguística, Gestão de Conhecimento, Web Semântica entre outras.”*

O ONTOBRAS tem o apoio da Associação Internacional de Ontologia e Aplicações (IAOA), uma organização sem fins lucrativos que visa objetivo promover a pesquisa interdisciplinar e a colaboração internacional na intersecção da ontologia filosófica, lingüística, lógica, ciência cognitiva, e ciência da computação. A IAOA também promove fóruns para o desenvolvimento de aplicações de análise ontológica para modelagem conceitual, engenharia do conhecimento, gestão do conhecimento, desenvolvimento de sistemas de informação, biblioteca e ciência da informação, pesquisa científica, e tecnologias semânticas em geral.

## Tipos de Ontologia na Engenharia Biomédica

**2.3.1 Ontologias na Engenharia Biomédica:** As ontologias são estruturas de dados semânticas que representam conhecimento em um domínio específico de uma forma legível por máquina e compreensível por humanos. Na Engenharia Biomédica, as ontologias são amplamente utilizadas para modelar conceitos, definições e relações entre entidades dentro de diferentes subáreas, como imagiologia médica, dispositivos médicos, informática médica, entre outras.

**2.3.2 Modelagem de Dados:** Uma das aplicações mais importantes das ontologias na Engenharia Biomédica é a modelagem de dados. Elas permitem a organização e representação estruturada de informações complexas, incluindo dados clínicos, dados genéticos, imagens médicas e informações sobre dispositivos médicos. A utilização de ontologias na modelagem de dados facilita a integração e interoperabilidade entre sistemas heterogêneos, permitindo a troca eficiente de informações entre diferentes aplicações e bancos de dados.

**2.3.3 Interoperabilidade de Sistemas:** A interoperabilidade é crucial na Engenharia Biomédica devido à natureza distribuída e heterogênea dos sistemas de informação em saúde. As ontologias desempenham um papel fundamental na garantia da interoperabilidade, fornecendo uma linguagem comum para representar e integrar dados de diferentes fontes e sistemas. Elas permitem que sistemas de informação em saúde comuniquem-se de forma eficaz, facilitando a troca de dados entre dispositivos médicos, registros eletrônicos de saúde, sistemas de suporte à decisão clínica e outras aplicações.

**2.3.4 Tomada de Decisões Clínicas:** As ontologias também são aplicadas na tomada de decisões clínicas, fornecendo um contexto semântico para a interpretação e análise de dados clínicos. Elas auxiliam na identificação de padrões, na extração de conhecimento e na formulação de hipóteses em diferentes cenários clínicos. Além disso, as ontologias podem ser utilizadas em sistemas de suporte à decisão clínica para fornecer recomendações personalizadas com base em evidências científicas e práticas clínicas.

**2.3.5 Desenvolvimento de Tecnologias Inovadoras:** Na Engenharia Biomédica, as ontologias são frequentemente empregadas no desenvolvimento de tecnologias inovadoras, como sistemas de imagem médica avançada, dispositivos médicos inteligentes e aplicações de medicina personalizada. Elas fornecem uma base sólida para a concepção e implementação de soluções tecnológicas que atendam às necessidades específicas dos pacientes e profissionais de saúde.

**2.3.6 Desafios e Considerações Futuras:** Apesar dos benefícios das ontologias na Engenharia Biomédica, ainda existem desafios significativos a serem enfrentados. Um dos principais desafios é a criação e manutenção de ontologias precisas e abrangentes que representem adequadamente o conhecimento em diferentes subáreas da Engenharia Biomédica. Além disso, questões relacionadas à interoperabilidade semântica, qualidade dos dados e padronização continuam a ser áreas de pesquisa e desenvolvimento ativo.

## CONCLUSÃO

As ontologias e a inteligência artificial desempenham papéis vitais na Engenharia Biomédica, proporcionando estruturas formais e métodos computacionais para representar, organizar, analisar e utilizar o conhecimento em diferentes domínios. Suas aplicações abrangem desde a modelagem de dados até a tomada de decisões clínicas e o desenvolvimento de tecnologias inovadoras. Embora enfrentem desafios significativos, as ontologias e a IA têm o potencial de revolucionar a Engenharia Biomédica, contribuindo para avanços significativos na assistência à saúde e no bem-estar humano.

## REFERÊNCIAS

Musen, M. A. (2015). The Protégé project: A look back and a look forward. *AI Matters*, 1(4), 4-12.

SBEB disponível em <<https://sbeb.org.br/>> Acessado em abril de 2024

Shaban-Nejad, A., Lavigne, M., Okhmatovskaia, A., Buckeridge, D. L., & Popescu, M. (2017).

Smith, B., & Mark, D. (2001). Do we need a theory of everything?. In *Proceedings of the 2001 AMIA Annual Symposium* (p. 589). American Medical Informatics Association.

Shortliffe, E. H., & Buchanan, B. G. (2012). A model of inexact reasoning in medicine. *Mathematical Biosciences*, 23(3-4), 351-379.

ONTOBRAS disponível em <<https://www.inf.ufrgs.br/ontobras/pt/170-seminario-de-pesquisa-em-ontologias-no-brasil-ontobras-2024/>> Acessado em Abril de 2024.

# DESARROLLOS PARA LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ

*Data de aceite: 01/07/2024*

### **Luis Rodrigo Palomera Rodríguez**

Gerente de Soporte Técnico México, Tata  
Steel Nederland

### **José Guadalupe Ramírez Vieyra**

Técnico Académico Titular A,  
Departamento de Ingeniería Metalúrgica,  
Facultad de Química, Universidad  
Nacional Autónoma de México

**RESUMEN:** Se describe el desarrollo de aceros en las últimas 7 décadas (1950 - 2020) y su relación intrínseca con los requerimientos de la industria automotriz, discutiendo aceros al carbono (Mild), aceros resistentes a abolladuras (**Bake Harden**), microaleados (**High Strength Low Alloy**), doble fase (**Dual Phase**) y fase compleja/ multifase (**Complex Phase /Multi Phase**), aceros de plasticidad inducida por transformación (**TR**ansformation **I**nduced **P**lasticity), aceros de plasticidad inducida por maclado (**TW**inning **I**nduced **P**lasticity), para finalmente consolidarlos en un diagrama único (banana chart o diagrama de formabilidad). Se discuten brevemente los proyectos **ULSAB (U**ltra **L**ight **S**teel **A**uto**B**ody) y **FSV (F**uture **S**teel **V**ehicle), usando como punto de partida conocimientos básicos de propiedades mecánicas y su relación con el estampado,

ya sea como pieza terminada o como parte de un ensamble.

### **DISCLAIMER**

El contenido de este texto es de autoría propia y se proporciona “tal cual” para fines informativos y educativos. El autor no garantiza la exactitud, integridad o utilidad de la información contenida en este documento. Cualquier acción que usted tome en base a la información presentada es bajo su propia responsabilidad. El autor no será responsable de ninguna pérdida o daño, incluyendo, sin limitación, pérdidas indirectas o consecuentes, o cualquier pérdida o daño que surja de la pérdida de datos o beneficios derivados del uso de este texto.

La reproducción, distribución, o uso de este texto, en parte o en su totalidad, está permitida siempre y cuando se otorgue el crédito adecuado al autor original. No se permite el uso comercial del contenido sin el permiso expreso del autor. Para consultas adicionales o permisos especiales, por favor, póngase en contacto con el autor.

## DEFINICIONES

### Aceros

Se define como acero cualquier aleación base hierro (Fe), con porcentajes desde un 70% [1] en un acero 316L (inoxidable austenítico) hasta un 99.99% [2] para aceros IF o ULC; los principales elementos aleantes son el carbono (C), el silicio (Si) y el manganeso (Mn). Existen otros elementos aleantes [3] de características especiales como el niobio (Nb/Cb), vanadio (V), titanio (Ti) o molibdeno (Mo), que cumplen con una función particular (refinamiento de grano, atrapamiento de especies libres, etc.) las cuales serán discutidas en la Sección 'Tipos de acero'.

La lámina de acero es muy versátil: tiene buena resistencia y alta rigidez a bajo costo, permitiendo altas velocidades de fabricación. Adicionalmente, tiene alta resistencia a la fatiga, buena resistencia a la corrosión (cuando tiene revestimiento), alta capacidad de absorción de energía, buen coeficiente de trabajo en frío y excelente pintabilidad, todas estas características requeridas en la industria automotriz [4].

### Proceso productivo de aceros planos<sup>1</sup> [4], [5], [6], [7], [8]

El primer paso consiste en la reducción del mineral de hierro en arrabio, una aleación eutéctica Fe-C, el primer subproducto (considerado como materia prima) a la salida del alto horno.

El siguiente proceso es la conversión del arrabio en acero para la fabricación de planchones; posterior a la obtención de hierro líquido, se requiere la eliminación de impurezas en el convertidor básico de oxígeno (**BOF**, **B**asic **O**xxygen **F**urnace). En términos generales, se utiliza el oxígeno para convertir el hierro elemental en magnetita, junto con otras especies presentes en el baño metálico (como el Si o el Mn); asimismo, este proceso reduce el contenido de especies no deseables, como el azufre (**S**) o el fósforo (**P**).

El fósforo reacciona con el oxígeno que se inyecta y, dependiendo la basicidad del baño, este se distribuye en la escoria; por otro lado, el azufre reacciona con dos especies: el oxígeno para formar el óxido correspondiente y con el manganeso en el baño para formar un sulfuro que es parcialmente removido en la escoria.

Posteriormente, si el producto requerido es un acero IF (**I**nterstitial **F**ree) o un ULC (**U**ltra **L**ow **C**arbon), el baño caliente pasa por el proceso de desgasificado, que es un requerimiento para aplicaciones automotrices (el cual solicita contenidos de carbono de hasta 0.005%). Otro elemento a remover en este proceso es el hidrógeno: a contenidos mayores a 4 ppm puede generar fracturas en la orilla del planchón. Adicionalmente, altas concentraciones de otras especies (C, N) pueden causar problemas ya sea en la fabricación o en la aplicación del material.

---

<sup>1</sup> Nota: para una referencia visual del proceso productivo del acero, se recomienda al lector consultar la referencia [6].

El desgasificado utilizado para aceros automotrices es el proceso Ruhrstahl Heraeus (RH) [9], que ofrece varias ventajas:

- Ciclos cortos (aprox. 25 min)
- Contenido final de carbono de 0.002%
- No requiere remoción de escoria por 'decantado'
- Alta eficiencia para plantas de alto volumen

El proceso final es la colada continua, donde se vacía el metal líquido desde un distribuidor (**tundish**) a un molde rectangular, agitando el baño mediante campos magnéticos (**EMS, Electro Magnetic Stirrer**), para iniciar la solidificación con niebla + agua (**mist cooling**); de aquí obtenemos un planchón (o **slab**), el cual tiene un espesor habitual de alrededor de 250 mm.

El planchón puede venderse como producto terminado o pasar a posteriores reducciones: de aquí obtenemos el producto rolado en caliente (**Hot Rolled, HR**) y rolado en frío (**Cold Rolled, CR**) los cuales pueden o no llevar algún recubrimiento, ya sea base Zinc (GI, GA), base Al (Usibor ®<sup>2</sup>) para estampado en caliente o base Zn + Al + Mg (MagiZinc ®, POSMAC ®, Magnelis ®<sup>3</sup>, etc). A su vez, todos estos productos son utilizados como materia prima para procesos posteriores de estampado.

## Microestructuras [10]

A presión atmosférica, existen 3 alótropos del hierro, que dependen de la temperatura: hierro alfa ( $\alpha$ -Fe), hierro gamma ( $\gamma$ -Fe) y hierro delta ( $\delta$ -Fe); estas fases son de suma importancia, ya que su estructura determina la solubilidad del carbono en la estructura cristalina, formando distintas microestructuras y, por consiguiente, diferentes tipos de acero (**Figura 1**).

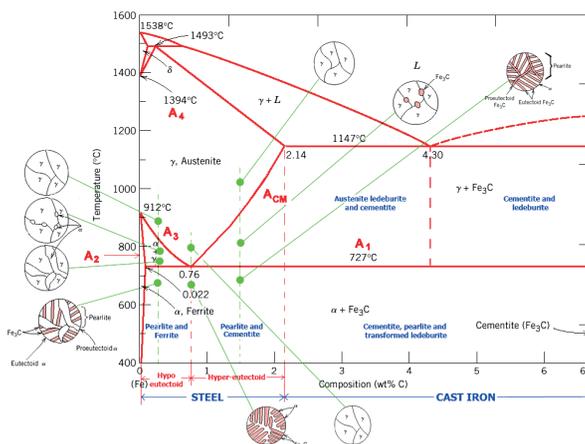


Figura 1. Diagrama Fe-C.

2 Usibor ® es un producto de Arcelor Mittal, diseñado específicamente para el estampado en caliente (**Hot Stamping**).  
 3 MagiZinc ® es marca registrada de Tata Steel MLE, POSMAC ® es marca registrada de Posco, Magnelis ® es marca registrada de Arcelor Mittal.

## Ferrita ( $\alpha$ )

El  $\alpha$ -Fe se refiere solo al alótropo de hierro, estable por debajo de los 912 °C; la ferrita es una solución sólida de uno o más elementos en  $\alpha$ -Fe. De estructura bcc (**B**ody **C**entered **C**ubic), la solubilidad del carbono depende de la temperatura, alcanzando el máximo a 727 °C. La ferrita es una fase muy suave y dúctil, aunque pierde un poco su tenacidad abajo de una temperatura crítica; esta fase también es magnética a temperaturas abajo de los 768 °C

## Austenita ( $\gamma$ )

La austenita es una solución sólida de carbono en  $\gamma$ -Fe, estable a partir de los 727 °C que, debido a su estructura fcc (**F**ace **C**entered **C**ubic), alcanza una solubilidad máxima del 2.14 %C a los 1147 °C. A temperatura ambiente, esta fase no es estable, se requiere modificar la composición química; existen algunos aceros inoxidables (base Cr-Ni) con base austenítica a temperatura ambiente, así como otras aleaciones (aceros Mangalloy) o aceros magnéticos base Fe-Ni. La austenita es una fase suave y dúctil, pero con alta respuesta al tratamiento térmico, lo cual la convierte en la 'fase madre' para los grados de acero que requieren una transformación microestructural; la austenita es no-magnética.

## Ferrita delta ( $\delta$ )

Esta microestructura (también fcc) no es observable de manera frecuente en productos planos, pero juega un papel importante en fundiciones de acero inoxidable austenítico, donde contribuye a evitar el fenómeno de fractura a alta temperatura (**hot cracking**).

## Cementita

Es un compuesto intersticial metaestable de hierro y carbono, con fórmula  $\text{Fe}_3\text{C}$  y estructura cristalina ortorrómbica; contiene un 6.7 %C, aunque en ocasiones este átomo puede ir acompañado de otros elementos, como Mn o Cr.

La cementita es de alta dureza, aumentando la resistencia del acero, con un valor de 800 HV y hasta 1400 HV en carburos de alta aleación.

## Perlita

Es una mezcla entre ferrita y cementita en un arreglo laminar (similar a una huella digital), la cual es formada durante la reacción eutectoide (reacción trifásica en la que un sólido, al enfriarse, se transforma en 2 sólidos adicionales,  $S_1 \rightarrow S_2 + S_3$ ). Esta estructura puede modificarse, esferoidizado la cementita mediante tratamiento térmico, por consiguiente cambiando las propiedades mecánicas del acero (en general, baja la resistencia y aumenta la ductilidad); el cambio y su efecto final lo determina el %C del grado de acero bajo estudio.

Mecánicamente, la perlita tiene características intermedias entre la ferrita y la cementita; el refinado de la estructura laminar incrementa tanto la resistencia como la resiliencia (absorción de energía durante la deformación plástica). Dependiendo de la distancia interlaminar, la dureza de la perlita va desde 250 HV hasta 400 HV.

## Bainita

La bainita es un microconstituyente metaestable de ferrita y cementita que se forma a temperaturas menores a las de formación de perlita. La apariencia de este microconstituyente al microscopio cambia con la temperatura de transformación: a altas temperaturas, tiene un aspecto de 'plumas', la cual es tradicionalmente conocida como bainita superior; en contraste, a bajas temperaturas el aspecto es 'acicular' (en forma de aguja), conocido también como bainita inferior.

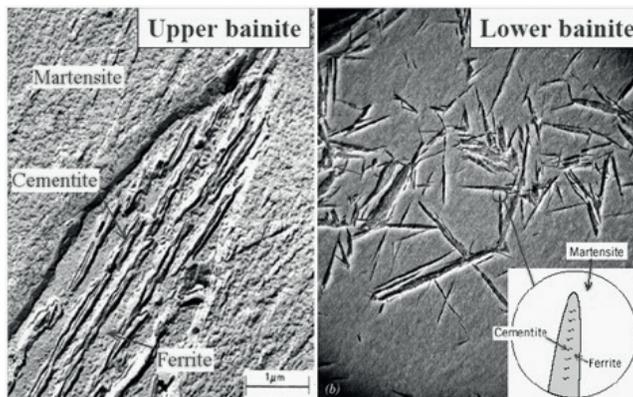


Figura 2. Bainita superior e inferior [10].

## Martensita

La martensita se forma cuando la velocidad de enfriamiento de la austenita es suficientemente alta (en función de la sección transversal, la templabilidad y el medio de enfriamiento); los átomos de carbono ocupan los espacios intersticiales dentro de la estructura cristalina del hierro en una estructura cristalina tetragonal centrada en el cuerpo (**B**ody **C**entered **T**etragonal), produciendo muy alta templabilidad e incrementando significativamente la fragilidad. El %C influye en su morfología: a bajos contenidos, se presenta la martensita de listón (lath), en contenidos más altos se presenta una estructura de tipo acicular/aguja (plate/ acicular martensite).

## PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO

La mayoría de las propiedades mecánicas del acero se obtienen a partir del estudio de la curva esfuerzo-deformación, realizando un ensayo de tracción a una probeta de geometría determinada. Como resultado del ensayo, se obtiene una curva similar a la mostrada en la Figura 3.

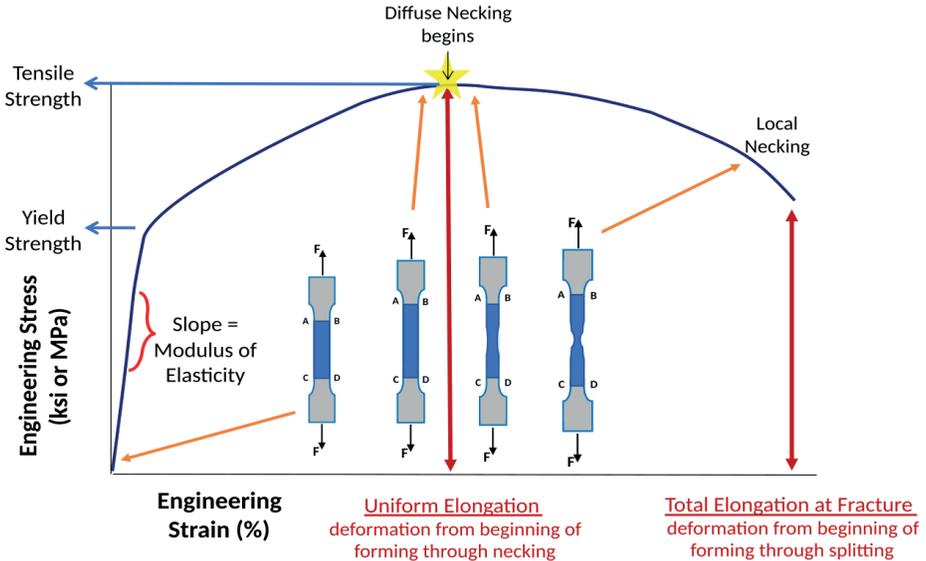


Figura 3. Curva esfuerzo-deformación.

A partir de esta curva se definen varios valores:

### Punto de fluencia/ Yield Strength (YP o $R_{p0.2}$ )

Punto de transición entre la zona elástica y plástica de un material. Macroscópicamente, es el valor a partir del cual la deformación de un material se hace permanente, aun cuando se remueva la carga (por ejemplo, durante el estampado). En el caso de algunos aceros, se presenta un fenómeno llamado Fluencia Discontinua (**YPE, Yield Point Elongation**) [11], donde el valor puntual del YP se ve sustituido por un intervalo de valores entre un máximo (**Upper Yield Strength**) y un mínimo (**Lower Yield Strength**), como se muestra en la Figura 4.

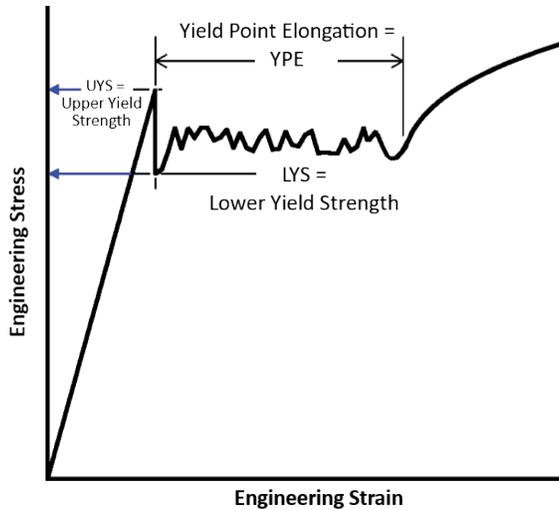


Figura 4. Fenómeno de Fluência Descontínua

### Esfuerzo de tracción/ Tensile Strength (TS o $R_m$ )

Se define como el esfuerzo máximo que soporta el material, a partir del cual el esfuerzo comienza a disminuir como resultado de la formación de una estricción o cuello que hace que el área transversal disminuya rápidamente y, finalmente, ocurra la fractura en esa zona (Figura 3). Dentro de un contexto metalmeccánico, esta fractura es en ocasiones deseada, por ejemplo, al cortar el material, ya sea como cinta o platina; o en la herramienta durante el proceso de estampado.

### Elongación (%el uniforme y total)

Tomando como partida la Figura 3, se define como elongación uniforme el valor de deformación en la parte más alta de la curva; la elongación total es el valor a la fractura (punto final de la curva).

### Coefficiente de trabajado en frío o valor n

Todos los metales endurecen cuando son deformados, lo que resulta en la forma parabólica tradicional de la curva esfuerzo-deformación, la cual se observa entre los valores de YP y TS.

Este comportamiento se puede aproximar con la ecuación de Hollomon:

$$\sigma = k\epsilon^n \quad \text{Ecuación (1)}$$

De esta ecuación se define el valor  $n$ , o coeficiente de trabajado en frío. Este parámetro adimensional se encuentra numéricamente entre 0 y 1.0, donde 0 representa un material perfectamente plástico y 1.0 representa un material perfectamente elástico; la mayoría de metales tienen valores de  $n$  entre 0.1 y 0.5.

Su efecto se puede visualizar comparando el desempeño del material en una sección estampada (deformada): sin trabajado en frío, esta zona adelgaza conforme el material se estira, aumentando el área de contacto; en contraste, con trabajado en frío ocurre lo contrario. El metal se fortalece en la zona con mayor deformación y así reduce la tendencia de adelgazamiento localizado.

Es importante mencionar que, aun cuando el YP, el TS, YP/TS y el %El son útiles para evaluar la formabilidad del material, el valor  $n$  y el espesor del material determinan la posición de la curva de formabilidad (FLC) en el diagrama de formabilidad<sup>4</sup> (FLD) [12].

### Valor $r$ o coeficiente de Lankford

Este valor es una medida de la anisotropía del acero, definido como el cociente de la deformación en espesor entre la deformación en el ancho de la probeta:

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \left\{ \frac{\ln \frac{w}{w_0}}{\ln \frac{t}{t_0}} \right\} \quad \text{Ecuación (2)}$$

En el estampado, el incremento en valor  $r$  del material mejora su comportamiento en el embutido profundo (Figura 5, [13])

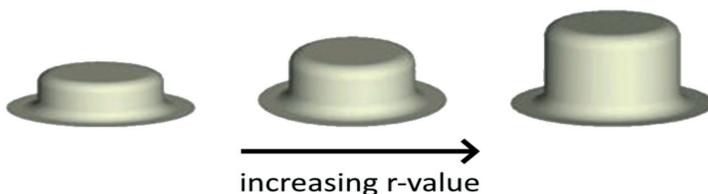


Figura 5. Influencia del valor  $r$  en el embutido profundo

### Valor $m$ [14]

El valor  $m$  se define de manera similar al valor  $n$ ; éste indica la sensibilidad del material a la velocidad de deformación,

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^n \cdot \epsilon^m \quad \text{Ecuación (3)}$$

<sup>4</sup> Se recomienda al lector consultar la referencia [15] para una discusión a detalle de FLC y FLD

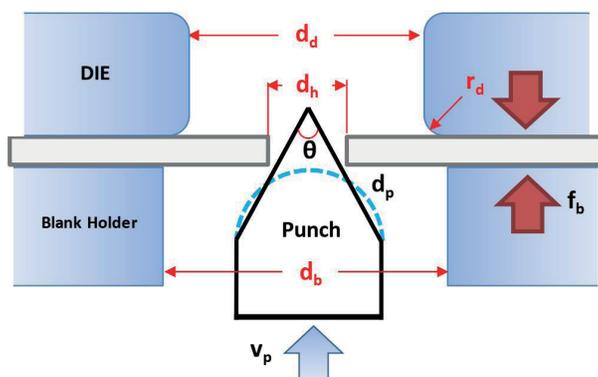
Experimentalmente, este valor se determina corriendo ensayos de tracción con velocidades de deformación desde  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  hasta  $10^3 \text{ s}^{-1}$ . Como referencia, la velocidad aproximada durante un proceso de estampado es de  $10 \text{ s}^{-1}$ ; de aquí, es natural observar un incremento en YP y TS de entre 15 - 20 MPa.

Este valor toma relevancia en pruebas de desempeño durante el impacto.

### Valor $\lambda$ o HEC (Hole Expansion Coefficient) [16], [17], [18]

Este valor determina experimentalmente la ductilidad de borde en un material estampado (Figura 6, [17]); particularmente en AHSS, uno de los principales retos es evitar las grietas de borde, donde la calidad de corte es un punto de control esencial (Figura 7, [18]). El cálculo del mismo es relativamente simple:

$$HEC = \frac{d}{d_h} - 1 \quad \text{Ecuación (4)}$$



- $v_p$ =punch velocity                       $f_b$ =blankholder force
- $\theta$ =punch angle (conical)               $d_d$ =diameter of the die
- $d_b$ =diameter of blankholder           $r_d$ =die radius
- $d_h$ =diameter of pierced hole in the blank
- $d_p$ =punch diameter (hemispherical)

Figura 6. Arreglo experimental para la medición de HEC [17]

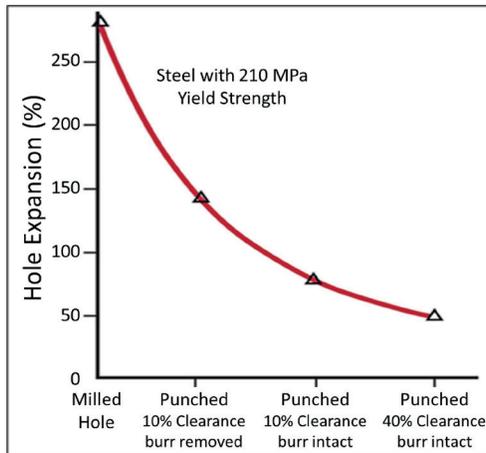


Figura 7. Influência de la calidad de corte en el valor HEC [18]

De esta breve explicación, se puede concluir que las propiedades mecánicas del material tienen marcada influencia durante su uso en la producción de partes terminadas, dependiendo no solo del grado de acero sino también de las condiciones de proceso; En la Tabla 1 se resume la influencia de las propiedades mecánicas en los tipos de estampado.

Tipo de estampado <sup>5</sup>	TS	%EI	n	r	$\lambda$
<b>Deep Draw</b>			↑↑	↑↑↑	
<b>Stretch form</b>	↑	↑↑	↑↑↑	↑	
<b>Stretch flange</b>	↑	↑↑	↑	↑↑	↑↑↑
<b>Bending</b>	↑	↑↑	↑		↑↑

Tabla 1. Influencia de las propiedades mecánicas en el tipo de estampado<sup>6</sup>

## TIPOS DE ACERO

En general, la industria automotriz clasifica los aceros según su microestructura; a continuación se ofrece un breve resumen de los tipos más utilizados.

<sup>5</sup> Un mayor detalle de las operaciones de estampado se puede consultar en la referencia [21].

<sup>6</sup> Leyenda: el número de flechas (↑) es relativo al nivel de influencia.

## Acero al carbón (mild steel) [19]

Cuentan con una cantidad limitada de elementos aleantes, tienen un YP relativamente bajo (<270MPa) y contenidos de carbono menores al 0.1%. Con una microestructura predominante de ferrita, en ocasiones se cuenta con perlita también, dependiendo siempre de la cantidad de carbono: a más %C, mayor cantidad de este microconstituyente. Los aceros ULC (**Ultra Low Carbon**) también se consideran dentro de esta clasificación, con valores bajos de YP y alta ductilidad.

Existen varias especificaciones para cada armadora/OEM (**Original Equipment Manufacturer**) con características específicas; Algunos ejemplos, con el material típicamente clasificado en orden incremental de YP, son :

- ASTM 1008M: CS, DS, DDS, EDSS
- EN 10130: DC01, DC03, DC04, DC05, DC06
- VDA 239-100: CR1, CR2, CR3, CR4, CR5

## Aceros Bake Hardening [20]

Aceros de alta resistencia que presentan un incremento en el YP al ser estampados a temperatura ambiente y sometidos posteriormente a un ciclo térmico similar a la ventana de curado de pintura automotriz, aproximadamente 170 °C durante 20 min.

Estos aceros tienen un rango de YP de 180 a 300MPa al embarque; los valores más bajos suelen ser utilizados para aplicaciones expuestas (páneles exteriores, de vista en el vehículo) y en áreas que requieren resistencia a la abolladura. El incremento observado después del ciclo térmico suele ser de +30 MPa en YP.

Algunos ejemplos de estos aceros son:

- ASTM 1008M: BHS 26, BHS 31, BHS 35, BHS 41, BHS 44
- EN 10268: HC180B, HC220B, HC260B
- VDA 239-100: CR180BH, CR210BH, CR240BH, CR270BH

## Aceros HSLA (High Strength Low Alloy) [22]

En contraste con aceros al manganeso u otros aleados con Cr (que incrementan el costo base del material), los aceros microaleados o HSLA contienen cantidades pequeñas (0.05% a 0.1%) de elementos como V, Mo y Nb. Los grados actuales llegan a niveles de YP >800MPa, utilizando mecanismos de precipitación de carburos en borde de grano, incremento de resistencia por mecanismos intersticiales y sustitucionales y refinamiento de grano.

Algunas normas que describen estos aceros son:

- ASTM A1008M: HSLAS 45, 50, 55, 60, 65, 70
- EN 10268: HC260LA, HC300LA, HC340LA, HC380LA, HC420LA, HC500LA
- VDA 239-100: CR210LA, CR240LA, CR300LA, CR340LA, CR380LA, CR420LA

### **Aceros Doble Fase (Dual Phase) [23]**

Estos aceros se caracterizan por una microestructura primordialmente formada por ferrita y martensita, de ahí su denominación. La fase ferrítica funge como matriz, dando buena ductilidad a este tipo de aceros, comparados con un HSLA por ejemplo.

En estos grados, existe una diferencia relevante entre las composiciones químicas para HR y CR: dado que el material rolado en caliente no cuenta con un proceso posterior de recocido, la microestructura apropiada se logra mediante enfriamiento controlado en la mesa (**Run Out Table**) a la salida de los bancos de reducción del molino y antes del enrollado. Este nivel de control requiere mayor cantidad de elementos aleantes, lo cual necesariamente impacta en los métodos de soldadura durante procesos posteriores.

Los aceros DP de primera generación son descritos por varias normas, algunos ejemplos son:

- ASTM A1088: DP 440T/250Y, 490T/290Y, 590T/340Y, 780T/420Y, 980T/550Y
- EN 10338: HCT450X, HCT490X, HCT590X, HCT780X, HCT980X, HCT1180X
- VDA 239-100: CR330Y590T-DP, CR440Y780T-DP, CR590Y980T-DP

### **Aceros Fase Compleja o Multifase (Complex Phase, MultiPhase) [24]**

Los aceros multifase combinan alta resistencia con una ductilidad mayor a la de un HSLA del mismo YP. Como el nombre lo indica, estos materiales contienen varias fases y microconstituyentes, entre ellas martensita, austenita retenida y perlita en una matriz de ferrita/bainita. El contenido de Ti y Nb, junto con un ciclo térmico que promueve la precipitación de carburos y nitruros, generan una refinación de grano muy alta.

Los aceros DP y TRIP no usan la precipitación en borde de grano como un mecanismo para incrementar la resistencia, por lo que la fase ferrítica presente en su microestructura suele ser suave y dúctil; en contraste, en los aceros CP/MP la precipitación de carburo y nitruros fortalecen la ferrita.

Este comportamiento explica por qué el YP suele ser mayor en un CP/MP cuando se compara contra un DP con el mismo valor de TS.

Algunos ejemplos:

- ASTM A1088: CP600T/350Y, 780T/500Y, 980T/700Y
- EN 10338: HCT600C, HCT780C, HCT980C
- VDA 239-100: CR570Y780T-CP, CR780Y980T-CP, CR900Y1180T-CP

## ACEROS TRIP/TWIP (Transformation Induced Plasticity/ Twinning Induced Plasticity) [25], [26]

La microestructura de un acero TRIP cuenta con una matriz ferrítica, con austenita retenida, martensita y bainita; todas estas fases y microconstituyentes se encuentran en cantidades específicas para cada grado. Durante la deformación, las fases secundarias dispersas en la ferrita suelen ser más duras, creando un alto coeficiente de trabajado en frío, comportamiento análogo al de un acero DP. Adicionalmente, la austenita retenida en la microestructura se transforma progresivamente en martensita, incrementando aún más este valor: este efecto es el que da el nombre al material (**TRIP effect**). Desde el punto de vista químico, se necesitan valores más altos de carbono para poder estabilizar la austenita; valores más altos de Si y Al aceleran la formación de la matriz ferrita/bainita, auxiliando en mantener la concentración necesaria de carbono libre para fomentar la existencia de austenita.

Los aceros TWIP tienen la mejor combinación entre resistencia (hasta 1400 MPa) y elongación (hasta 55%). Con un contenido de entre 12% y 30% de Mn, la microestructura es austenítica a temperatura ambiente; otros elementos aleantes son el Si (<3%), Al (<3%) y C (<1%).

El nombre del material viene por el fenómeno de maclado o twinning, lo que genera refinación microestructural, aumentando el valor  $n$  del material. Para entender las prestaciones de este tipo de aceros, se puede hacer una comparativa con materiales Intersticial Free o **ULC** (anteriormente descritos): tradicionalmente considerados los aceros más formables, tienen un rango de valores de 150 MPa en YP, 300 MPa en TS, 22-25 % $E_{u}$  y 45-50 % $E_{total}$ . En contraste, un acero TWIP está en un rango de 500 MPa YP, 1000 MPa TS, 55%  $E_{u}$  y 60 %  $E_{total}$ .

Estos grados se han adoptado en cantidades limitadas: un ejemplo reciente es el cambio del ensamble de la defensa del Fiat Panda 2011, donde sustituyó a un acero de estampado caliente + DP600 de 1.5mm por un TWIP 1000 de 1.4mm, generando una reducción de peso del 28% y una reducción de costo del 22%.

La asociación World AutoSteel representa la mayoría de grados (e indirectamente, la historia del acero) en un diagrama global de formabilidad, o GFD (**G**lobal **F**ormability **D**igram, Figura 8); asimismo, indica las áreas actuales de desarrollo para nuevos aceros.

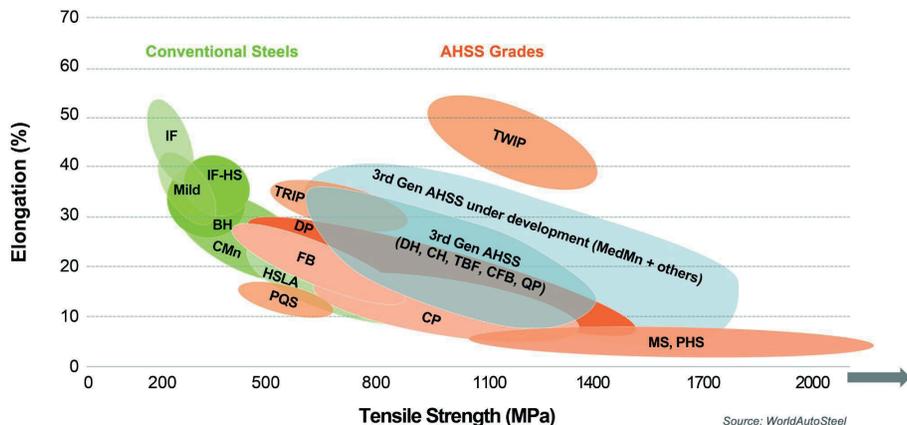


Figura 8. Diagrama Global de Formabilidad (cortesía de World AutoSteel)

## PROYECTOS INTERDISCIPLINARIOS

### ULSAB - Ultra Light Steel Auto Body (1995 - 1998) [27]

ULSAB fue un proyecto multicompañía organizado por el **American Iron and Steel Institute (AISI)**, con la participación de 35 acereras a nivel mundial, junto con **Porsche Engineering Services**; tuvo como objetivo demostrar la capacidad del acero de reducir el peso de la carrocería (BIW, **Body In White**) y, al mismo tiempo, garantizar la seguridad, incrementando el confort y la experiencia de manejo, a un precio razonable<sup>7</sup>, Figura 9.

El proyecto inició con una comparativa (benchmarking) entre sedanes medianos de varias marcas a nivel mundial. Después de consultar con expertos en manufactura, diseño y selección de materiales, PES desarrolló objetivos de reducción de masa y desempeño. En Sept. 1995 se anuncian los resultados de la Fase 1 (Concepto), con un potencial 36% de ahorro en masa y una marcada mejora en el rendimiento, comparado con los vehículos disponibles en el mercado de aquel entonces.

Durante la Fase 2 (Validación), se refinó la ingeniería y el diseño de la estructura ULSAB, junto con la aprobación de un presupuesto de US \$20 M para iniciar la Fase 3 (Construcción).

En marzo de 1998, los resultados de esta última fase se anuncian a nivel mundial:

- Peso total del BIW de 203 kg, 25% menor contra vehículos de mercado
- Incremento del 80% en rigidez torsional
- Incremento del 52% en rigidez de flexión
- Incremento del 58% en primer modo de flexión<sup>8</sup>

<sup>7</sup> Se recomienda al lector consultar el 'Ultra Light Steel Autobody Final Report' disponible en <https://www.sae.org/>

<sup>8</sup> **First bending mode**: se define como la frecuencia más baja a la cual se presenta deformación en una estructura

Pruebas adicionales muestran que esta estructura cumple con los requerimientos de seguridad de impacto a velocidades aún mayores a las requeridas en algunas pruebas, todo esto sin un incremento de costo.

Este proyecto requirió el diseño de procesos de manufactura considerados únicos en aquel entonces, todos ellos patentables. Se decide que los resultados del proyecto, así como las tecnologías desarrolladas durante el mismo, sean de libre uso para los participantes y para el público en general, clasificando la información de libre acceso.



Figura 9. BIW obtenido como resultado del proyecto ULSAB

## FSV - Future Steel Vehicle (2010 - 2103) [28]

FSV tuvo como objetivo crear diseños completos para vehículos con tren motriz eléctrico, priorizando la reducción de emisión de gases de efecto invernadero durante todo el ciclo de vida del vehículo<sup>9</sup>, Figura 10.

Con una duración de tres años, Se obtuvieron los siguientes siete logros clave:

- Se optimiza el uso del acero dentro del BIW usando simulaciones para determinar el grado y espesor ideales en la estructura. Por consiguiente, los vehículos diseñados son ligeros y de alta eficiencia.
- Se logra una reducción en masa del BIW del 35% comparado con vehículos clase A (mini) y clase B (pequeños)<sup>10</sup>; de 290 kg en un vehículo de mercado, se obtuvo una estructura de 230 kg.
- Se usa un 97% de aceros clasificados como HSS y UHSS (**H**igh y **U**ltra **H**igh **S**trength **S**teel), dentro de los que se incluyen grados DP, CP, TRIP, TWIP y martensíticos; dentro de la selección de material se incluyen 20 grados nuevos de acero; estos fueron puestos disponibles comercialmente a partir del 2015 y hasta el 2020.

<sup>9</sup> Se recomienda al lector consultar el sitio web para mas detalle <https://www.worldautosteel.org/downloads/futuresteel-vehicle-results-and-reports/>

<sup>10</sup> Una clasificación general de vehículos por tamaño se encuentra en [https://en.wikipedia.org/wiki/Vehicle\\_size\\_class](https://en.wikipedia.org/wiki/Vehicle_size_class)

- La estructura incluye el uso de aceros de TS > 1.0GPa (TRIP, TWIP, CP) y formados en caliente, todas tecnologías de punta en aquel entonces. Estos grados responden al requerimiento de la industria de aceros (alta resistencia + alta formabilidad), para cumplir requerimientos de seguridad cada vez más severos.
- Este proyecto, al ser evaluado durante pruebas de impacto, logra una calificación de 5/5 estrellas según EuroNCAP, sobrepasando el requerimiento de mercado.
- El uso de aceros AHSS y un tren motriz eléctrico reduce las emisiones de gases de invernadero en un 56%. En regiones con red eléctrica más eficiente, como Europa, la reducción llega al 70%.
- Estas reducciones de masa y emisiones **no** afectan el costo de producción: el costo estimado de la estructura es de US\$1,115.



Figura 10. Render final del proyecto FSV

## REFERENCIAS

1. ThyssenKrupp UK. (n.d.). *Stainless Steel 316L - 1.4404 Data Sheet*. thyssenkrupp Materials (UK). Consultado el 1 de Junio de 2022. <https://www.thyssenkrupp-materials.co.uk/stainless-steel-316l-14404.html>.
2. World AutoSteel. (n.d.). *Ultra-Low Carbon (DDS – EDDS) - AHSS Guidelines*. AHSS Insights. Consultado el 1 de Junio de 2022. <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/lower-strength-steels/ultra-low-carbon-dds-edds-2/>.
3. World AutoSteel. (n.d.). *High Strength Low Alloy Steel - AHSS Guidelines*. AHSS Insights. Consultado el 1 de Junio de 2022. <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/high-strength-low-alloy-steel/>.
4. Palomera, L. R. (2016). *Estudio de formabilidad en aceros planos*. <http://132.248.9.195/ptd2016/septiembre/0750396/Index.html>.
5. Hosford, W. (2011). *Metal Forming, Metallics and Metallurgy*. Cambridge University Press.
6. AIST. (2015). *Association for Iron and Steel Technology*. AIST Steel Wheel. Consultado el 8 de Junio de 2022, <http://apps.aist.org/SteelWheel/index.html>.

7. Nippon Steel. (n.d.). *Manufacturing Process | Steel sheets | Products | Nippon Steel Corporation*. [www.nipponsteel.com](http://www.nipponsteel.com). Consultado el 6 de Junio, 2024, de <https://www.nipponsteel.com/en/product/sheet/process/>.
8. Sarna, K. (n.d.). *Ispat Guru*. Consultado el 8 de Junio, 2022, de <http://ispatguru.com>.
9. Second Wiki. (n.d.). *Ruhrstahl-Heraeus process*. Second.wiki. Consultado el 8 de Junio de 2022, <https://second.wiki/wiki/ruhrstahl-heraeus-verfahren>.
10. Sarna, S. (2014, March 20). *Microstructures of Iron and Steels – IspatGuru*. Consultado el 13 de Junio de 2022, <https://www.ispatguru.com/microstructures-of-iron-and-steels/>.
11. Instron. (n.d.). *Yield Point Elongation*. Instron. Consultado el 13 de Junio de 2022, <https://www.instron.com/en/our-company/library/glossary/y/yield-point-elongation>.
12. World AutoSteel. (n.d.). *N-Value - AHSS Guidelines*. AHSS Insights. Consultado el 13 de Junio de 2022, <https://ahssinsights.org/forming/mechanical-properties/n-value/>.
13. World AutoSteel. (n.d.). *R-Value - AHSS Guidelines*. AHSS Insights. Consultado el 15 de Junio de 2022, de <https://ahssinsights.org/forming/mechanical-properties/r-value/>.
14. World AutoSteel. (n.d.). *M-Value - AHSS Guidelines*. AHSS Insights. Consultado el 14 de Junio de 2022, <https://ahssinsights.org/forming/mechanical-properties/strain-rate/>.
15. World AutoSteel. (n.d.). *Forming Limit Curves (FLC) - AHSS Guidelines*. AHSS Insights. Consultado el 15 de Junio de 2022, <https://ahssinsights.org/forming/formability/forming-limit-curves-flc/>.
16. ZwickRoell. (n.d.). *Hole expansion test*. ZwickRoell. Consultado el 14 de Junio de 2022, <https://www.zwickroell.com/industries/materials-testing/sheet-metal-forming/hole-expansion-test/>.
17. Altan, T. (n.d.). *Schematics of Hole Expansion Test* [Cross section view of HEC testing including jig] [Image]. AHSS Insights. Consultado el 14 de Junio de 2022, <https://ahssinsights.org/forming/testing-characterization-forming/hole-expansion-testing/>.
18. World AutoSteel. (n.d.). *Hole Expansion Testing - AHSS Guidelines*. AHSS Insights. Consultado el 14 de Junio de 2022, <https://ahssinsights.org/forming/testing-characterization-forming/hole-expansion-testing/>.
19. World AutoSteel. (n.d.). *Mild Steels - AHSS Guidelines*. AHSS Insights. Consultado el 15 de Junio de 2022, <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/lower-strength-steels/mild-steels/>.
20. World AutoSteel. (n.d.). *Bake Hardenable - AHSS Guidelines*. AHSS Insights. Consultado el 15 de Junio de 2022, <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/ahss/bake-hardenable-steel/>.
21. Schuler GmbH. (1998). *Metal Forming Handbook* (H. Hoffman & Schuler GmbH., Eds.). Springer-Verlag.
22. World AutoSteel. (n.d.). *High Strength Low Alloy Steel - AHSS Guidelines*. AHSS Insights. Consultado el 1 de Junio de 2022, <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/high-strength-low-alloy-steel/>.

23. World AutoSteel. (n.d.). *Dual Phase - AHSS Guidelines*. AHSS Insights. Consultado el 15 de Junio de 2022, <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/ahss/dual-phase/>.
24. World AutoSteel. (n.d.). *Complex Phase - AHSS Guidelines*. AHSS Insights. Consultado el 15 de Junio de 2022, <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/complex-phase-steel/>.
25. World AutoSteel. (n.d.). *Transformation Induced Plasticity (TRIP) - AHSS Guidelines*. AHSS Insights. Consultado el 15 de Junio de 2022, <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/3rdgen-ahss/transformation-induced-plasticity-trip/>.
26. World AutoSteel. (n.d.). *Twinning Induced Plasticity - AHSS Guidelines*. AHSS Insights. Consultado el 14 de Junio de 2022, <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/ahss/twinning-induced-plasticity/>.
27. World AutoSteel. (n.d.). *ULSAB*. WorldAutoSteel. Consultado el 14 de Junio de 2022, <https://www.worldautosteel.org/projects/ulsab/>.
28. World AutoSteel. (n.d.). *FutureSteelVehicle*. WorldAutoSteel. Consultado el 15 de Junio de 2022, <https://www.worldautosteel.org/projects/future-steel-vehicle/>.

# EFFECTS OF CO<sub>2</sub> PENETRATION ON THE PROPERTIES OF SELF-COMPACTING MORTARS WITH HIGH CONTENTS OF SUPPLEMENTARY CEMENTITIOUS MATERIALS

*Data de submissão: 11/06/2024*

*Data de aceite: 01/07/2024*

### **Aretuza Karla Araújo da Rocha**

Universidade Federal de Roraima (UFRR)  
Boa Vista – Roraima  
<https://orcid.org/0000-0002-3775-6624>

### **Hugo Alessandro Almeida Diniz**

Instituto Federal De Educação, Ciência e  
Tecnologia do Ceará (IFCE)  
Quixadá – Ceará  
<https://orcid.org/0000-0002-6361-024X>

### **Anne Raquel da Costa Araujo**

Universidade Federal do Rio grande do  
Norte (UFRN)  
Natal – Rio Grande do Norte  
<https://orcid.org/0009-0005-1993-676X>

### **Ruan Landolfo da Silva Ferreira**

Instituto Federal De Educação, Ciência e  
Tecnologia de Pernambuco (IFPE)  
Pesqueira – Pernambuco  
<https://orcid.org/0000-0001-6744-5395>

### **Marcos Alyssandro Soares dos Anjos**

Instituto Federal De Educação, Ciência e  
Tecnologia da Paraíba (IFPB)  
João Pessoa – Paraíba  
<https://orcid.org/0000-0001-9563-2534>

### **Normando Perazzo Barbosa**

Universidade Federal da Paraíba (UFPB)  
João Pessoa – Paraíba  
<https://orcid.org/0000-0003-4497-8900>

**ABSTRACT:** This article evaluates the influence of accelerated carbonation on mortars with reduced amounts of cement intended for self-compacting concrete (SCC). To this end, cement was replaced by different types of supplementary cementitious materials (SCMs), including metakaolin (MK), rice husk ash (RHA) and sugar cane biomass ash (SCBA). In addition, hydrated lime (HL) was added to some mixtures to replenish the alkaline content of the system. The effects of the carbonation of the pastes with SCMs and with the addition of HL were observed using X-ray diffraction (XRD), thermogravimetry (TG) analyses and compressive strength tests. HL optimized the alkaline reserve together with MK, but did not interact well with SBCA, increasing the depth of carbonation. However, the pastes with the SCMs showed carbonation depths below the normative standards. The XRD results revealed preferential carbonation of calcium hydroxide compared to secondary C-S-H. In terms of compressive strength, the pastes with SCMs and with and without the addition of HL obtained lower results, which, however, does not make the use of these materials unfeasible since the loss of strength was not significant. The results show that the use of high contents of SCMs

and the addition of HL are important to obtain self-compacting pastes that are more resistant to CO<sub>2</sub> penetration, which will help to obtain more durable constructions with a lower carbon footprint.

**KEYWORDS:** Cleaner production. Resistance to CO<sub>2</sub> penetration. Sustainability. Mineral admixtures.

## INTRODUCTION

The construction industry is a major consumer of natural resources, from the extraction of aggregates (sand and gravel) to the production of Portland cement, which contributes negatively to greenhouse gas emissions (Perlot et al., 2013; Mikulčić et al., 2016), accounting for over 60% of global production (Scrivener et al., 2018).

One way to reduce these impacts is to use supplementary cementitious materials (SCMs) or also called mineral admixtures, as a partial replacement for cement. When used in adequate quantities, SCMs provide improved workability, mechanical performance and durability, as well as economic benefits and reduced environmental pollution (Uysal; Yumas, 2011).

SCMs can be inert or pozzolanic materials, but each type has different effects on the properties of mortars and concretes in the fresh and hardened state and on their durability, with their advantages and disadvantages. Their advantages can be exploited by combining various SCMs, thus increasing the level of cement replacement (Le; Ludwig, 2016).

Pozzolanic materials contribute to improving binding properties, given their ability to react with the calcium hydroxide released during cement hydration and consequently produce additional hydrates that are responsible for developing mechanical strength. Nevertheless, these materials can contribute to the quality of the cement product as they help to improve the compactness of the system, which results in increased durability as porosity is reduced and attack by external agents is made more difficult (Apaza Medina, 2011).

In relation to attack by external agents, carbonation stands out because it is a common phenomenon in concrete structures. Carbonation occurs through the penetration of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), present in the atmosphere in gaseous form, into the pores of concrete (Ollivier; Vichot, 2014), resulting in a reduction in the durability of reinforced concrete.

The carbonation reaction is not detrimental to the mechanical properties of common Portland cement-based materials, but it does cause a reduction in alkalinity which can lead to chemical degradation in relation to the structure of reinforced concrete steel bars (Qiu, 2020). This is due to the reaction of CO<sub>2</sub> with the cement's hydrated alkaline compounds, reducing the internal pH of the cement matrix.

In the alkaline environment, a protective film forms on the steel that prevents it from oxidizing. The reinforcement of reinforced concrete is said to be in a passive state. When CO<sub>2</sub> penetrates inside the concrete pores, contact with water produces carbonic acid

( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ). When this carbonic acid reacts with the calcium hydroxide present in the concrete, it produces calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ).

In view of the aspects related to the durability of concrete and, in particular, the effects of carbonation, this work aims to evaluate the effects of replacing Portland cement with various types of SCMs such as sugarcane bagasse ash (SCBA), rice husk ash (RHA) and metakaolin (MK) on the resistance to carbonation of mortars for self-compacting concrete. In addition, the effects of using hydrated lime (HL) (or calcium hydroxide) were also investigated.

## STATE OF-THE-ART

Currently, there are several types of SCMs capable of replacing Portland cement and improving the properties of materials, including fly ash (FA), limestone filler (LF), slag and fine bagasse ash (Dossche et al., 2016). Among the SCMs obtained from ashes, sugar cane biomass ash (SBCA) and rice husk ash (RHA) stand out, as they are materials that contribute to improving viscosity and stability in the fresh state (Sua-lam; Makul, 2017).

When RHA is used in mortars, the compressive strength increases significantly due to pozzolanic reactions and the filler effect. However, the pozzolanic reaction of RHA only slightly increases the compressive strength during the early ages, i.e. at 7 and 14 days of hydration. Normally, reactions involving RHA take place significantly after 90 days of hydration (Jamil et al., 2016). The pozzolanic reaction of RHA depends on particle size, age and cement replacement percentages. The pozzolanic reaction of RHA depends on particle size, age and cement replacement percentages.

This ash has a high silica content ( $\text{SiO}_2$ ), which makes it a supplementary source for use as a mineral admixture or pozzolan for the production of cementitious materials (Anjos, 2009). MK can also be used as an SCMs, as it consists of amorphous silica and alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) and is capable of reacting with calcium hydroxide ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) to produce new hydrated compounds such as C-S-H.

Anjos et al. (2020) produced self-compacting concrete with cement consumption of only  $120 \text{ kg/m}^3$  and  $200 \text{ kg/m}^3$ , with mineral admixtures of MK and FA. X-ray diffraction (XRD) showed that the main hydrated products formed were gismondin and C-S-H, and portlandite was completely consumed in some mixtures, except for those with fly ash and hydrated lime (HL).

SCMs can increase strength and electrical resistivity, however, due to their pozzolanicity, they consume calcium hydroxide, reducing the pH of the concrete and making the steel more susceptible to corrosion. Carbonation is a concrete deterioration process. Its depth of penetration is normally used to estimate the useful life of concrete. Among the most important factors that can significantly affect the carbonation resistance of concrete are the relative humidity (RH) and the water cement ratio (Elsalamawy et al., 2019).

The compressive strength of the concretes for all mix proportions increased with curing age and decreased with increasing SCBA replacement. The reduction in compressive strength at 10%, 20% and 30% cement replacement with SCBA compared to the reference concrete was 16.8%, 25% and 35.5%, respectively (Joshaghani; Moeini, 2017).

Safiuddin et al. (2010) used cement substitutions with RHA of up to 30%. The result of their study showed that increasing the content of RHA in the mixture considerably increased (by more than 10%) the compressive strength, and to a lesser extent the ultrasonic pulse velocity.

For Kannan (2018), the compressive strength at 28 and 90 days in self-consolidating concretes (SCC) with 5% to 30% metakaolin and obtained the best result with 15% replacement. He also studied the interaction with RHA and found that the ternary mixture with up to 40% replacement showed good results.

## EXPERIMENTAL PROGRAM

### Materials

In this research, a high early strength Portland Cement (CPV-ARI), equivalent to OPC Type III according to ASTM C150 and CEM I according to EN 197-1, was used. This cement was chosen due to its lack of pozzolanic materials, which facilitates the analysis of the synergistic effects of the different components in the production of mortars. Additionally, high purity hydrated lime (CH-I type) was used as a complementary binder to maintain the system's alkalinity and enhance the reactivity of the supplementary cementitious materials (SCMs). Natural river sand with a maximum diameter of 2.40 mm, a fineness modulus of 2.20 and a specific gravity of 2.65 kg/dm<sup>3</sup> was used as fine aggregate.

Three types of SCMs were used to produce the mortars:

- Sugarcane bagasse ash (SCBA): this ash comes from burning sugarcane bagasse in the municipality of Arez (RN-Brazil). Before use, the SCBA was dried in an oven at 100 °C for 24 hours and then subjected to a particle size reduction process using a ball mill for 3 hours.
- Rice husk ash (RHA): derived from burning rice husks to generate energy at a factory in Alegrete (RS-Brazil). The combustion temperature used to produce RHA was approximately 700°C.
- Metakaolin (MK): commercial product supplied by Metafort (Ipojuca - Pernambuco, Brazil), orange in color and moderately reactive. A 20% MK content was used in all the pastes in order to maintain mechanical strength and further reduce the cement content.

The specific surface area (SSA) of the Portland cement and the SCMs was determined using the Brunauer, Emmett, and Teller (BET) method. For this test, one gram of each material was taken and dried in an oven. The results are presented in Table 1.

Materials	SSA (m <sup>2</sup> /g)
Cement	1.70
SCBA	54.26
RHA	16.04
MK	16.11
HL	10.64

Table 1. Specific surface area (SSA) of cement, hydrated lime and SCMs

The crystalline phases of the materials were identified by X-ray diffraction (XRD) using a diffractometer with CuK $\alpha$  radiation ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ) operating at an applied voltage of 45 kV, a power of 1000 W and a current of 25 mA. Measurements were carried out over a range of 5-70° 2 $\theta$ , with a step time of 0.5 s and a nitrogen filter. The crystalline phases were identified using High Score Plus software and the results can be seen in Fig. 1.

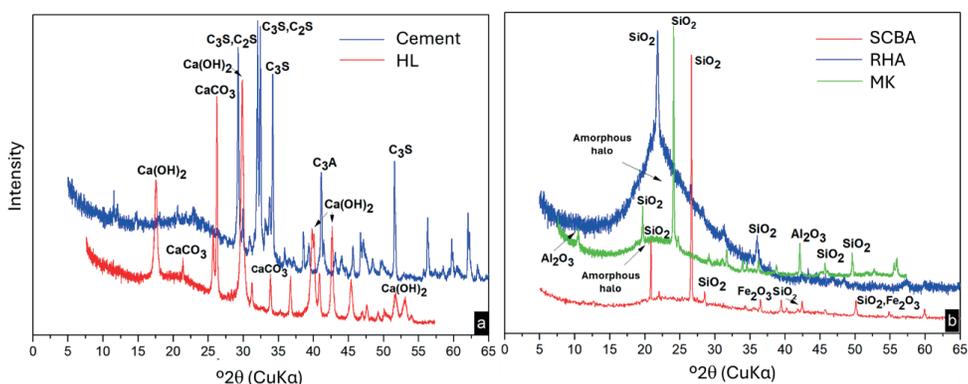


Figure 1. X-ray diffraction patterns of (a) cement, hydrated lime and (b) SCMs.

The chemical composition of the materials in terms of the main oxides was determined by X-ray fluorescence (XRF) and the results can be seen in Table 2.

Main Oxides (%)	CEM	HL	SBCA	RHA	MK
CaO	61.39	97.20	2.47	0.94	0.45
SiO <sub>2</sub>	19.13	1.32	60.04	92.42	53.92
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.65	0.47	25.78	0.09	9.90
SO <sub>3</sub>	3.26	0.13	0.34	0.13	0.22
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.99	0.40	3.08	2.01	30.34
MgO	3.15	0.00	1.02	0.00	0.00
K <sub>2</sub> O	0.52	0.40	3.39	0.00	2.25
Others	4.91	0.08	3.88	4.40	2.92

Table 2. Chemical oxides (wt. %) of cement (CEM), hydrated lime and SCMs

Fig. 2 shows the results of the reactivity test of the SCMs using the direct compressive strength method determined by ABNT NBR 5751 (2015).

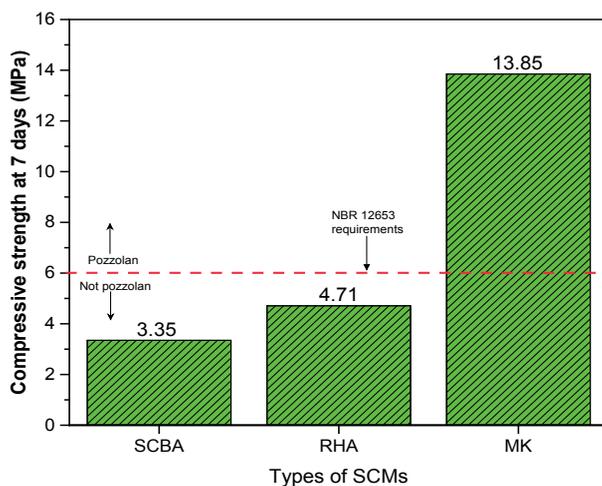


Figure 2. Pozzolanic activity with lime from SCBA, RHA and MK

It can be seen that the metakaolin had a strength above 6 MPa, which is a necessary requirement to attribute pozzolanicity to the materials investigated, according to ABNT NBR 12653 (2014). Although the RHA did not achieve a value of 6 MPa, the results are consistent with those presented in the next section of this chapter and with findings from previous studies (Fapohunda et al., 2017).

## Mortar Mixing Design

The mixture proportions were defined with the aim of producing low-cement mortars for self-compacting concrete (SCC). The reference mix (REF) was defined from a self-compacting concrete previously tested in the laboratory (Diniz, 2018; Diniz et al., 2022), removing only the coarse aggregate from its composition. Table 3 shows the mixing ratio by mass of each mortar. Because the SCMs act as viscosity modifiers and for the mortars to reach a consistency of 300 mm  $\pm$  50mm, a superplasticizer (SP) additive such as Glenium SCC 160 (BASF) was used.

Sample	Materials (Kg/m <sup>3</sup> )							%SP
	CEM	SCBA	RHA	MK	HL	Sand	Water	
REF	719.90	-	-	-	-	1180.64	316.76	0.10
S40	411.82	274.55	-	-	-	1125.65	302.00	3.50
S40L10	373.47	248.98	-	-	62.25	1122.91	301.27	0.60
R40	415.52	-	277.01	-	-	1135.75	304.71	2.10
R40L10	376.51	-	251.01	-	62.75	1132.04	303.72	0.95
M40	424.09	-	-	282.73	-	1159.18	311.00	1.10
M40L10	383.53	-	-	255.69	63.92	1153.16	309.38	0.10

Table 3. Mix design of mortars for self-compacting concrete (SCC)

### Molding mortars for SCC

For each mortar, 15 cylindrical samples measuring 5x10 cm<sup>2</sup> and 15 cubic samples measuring 5x5x5 cm<sup>3</sup> were made. The mixing sequence for the materials was based on ABNT NBR 13281 (2005), but some adaptations were necessary. Initially, half the sand and water were mixed for 30 seconds. Next, cement, MK, the rest of the sand and 30% of the water were mixed for 60 seconds. Next, 50% of the additive was added and the mixture was homogenized for 90 seconds. Finally, the SCBA or RHA, together with the lime and the rest of the water (2%) and the SP additive (50%) were mixed for 120 seconds. After mixing, the mortars were placed in the molds mentioned above. After 24 hours of molding, the samples were demolded, identified and immersed in water saturated with lime for 28 days. After this period, the samples were dried in the open air for 14 days and then placed in the carbonation chamber.

### Characterization in the hardened state

Fig. 3 shows a schematic drawing of the chronology of the tests and techniques used, as well as the respective environments used in each analysis. The following topics highlight all the protocols used in each test and technique.

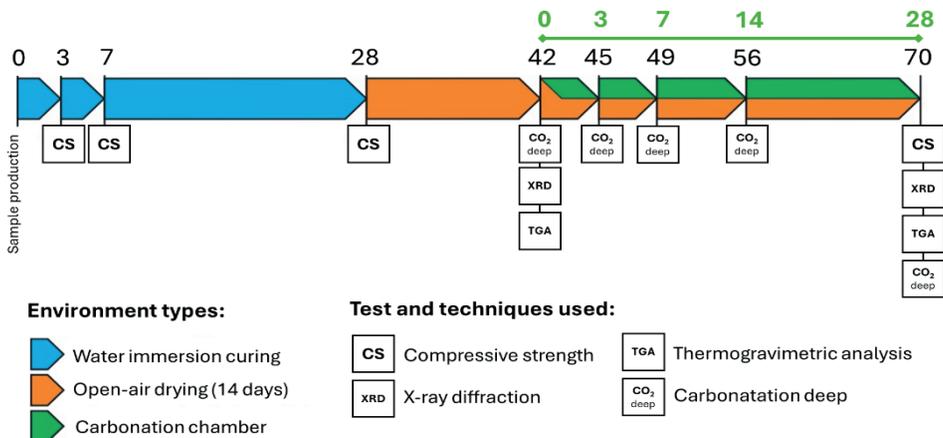


Figure 3. Schematic drawing of the chronology of the tests and techniques used

### *Compressive strength test*

For this test, three cylindrical specimens were made for each age and broken in axial compression at 3, 7, 28 and 70 days from the date of molding. The compressive strength test was carried out based on the recommendations of ABNT NBR 13279 (2015).

### *Microstructural analysis*

Microstructural analysis was carried out using XRD and thermogravimetric analysis (TGA) techniques. The samples were collected from specimens that were pulverized using a porcelain mortar with a Gauss hand. After this procedure, the samples were sieved using a 0.075 mm sieve (#200 mesh) and the passing material (below 0.075 mm) was used in the XRD and TGA analyses. The operating parameters for XRD were the same as those described in section 3.1 and for TGA, a Shimadzu DTG-60H thermal analyzer was used, operating at a heating rate of 10°C/min under a nitrogen atmosphere and a gas flow of 50 mL/min. No method of stoppage of the reactions was used in order to preserve the microstructure (Taylor, 1997).

The analyses were carried out before and after the samples entered the carbonation chamber. Nevertheless, the use of these microstructural analysis techniques allowed us to infer the influence of carbonation on the formation of hydrated products in mortars with the incorporation of various SCMs and with and without the addition of HL.

## CO<sub>2</sub> Penetration depth

After curing and drying at 42 days, the carbonation test was carried out at 5 different ages, counted from the day they entered the chamber: 0 days (when entering the chamber) and 3, 7, 14 and 28 days (after entering the chamber). The CO<sub>2</sub> concentration in the chamber was 10% ± 0.5%, the temperature was 20 ± 2°C and the relative humidity was 55 ± 5%. Three cubic specimens were made for each age. To quantitatively determine the depth of CO<sub>2</sub> penetration, measurements were taken in the areas where there was no change in color using a caliper.

## RESULTS AND DISCUSSIONS

### Microstructural analysis

The results of the microstructural analysis using XRD and TGA techniques can be seen in Figs. 4 to 10. Fig. 4a shows that the portlandite peaks of the REF sample decrease after carbonation in the chamber.

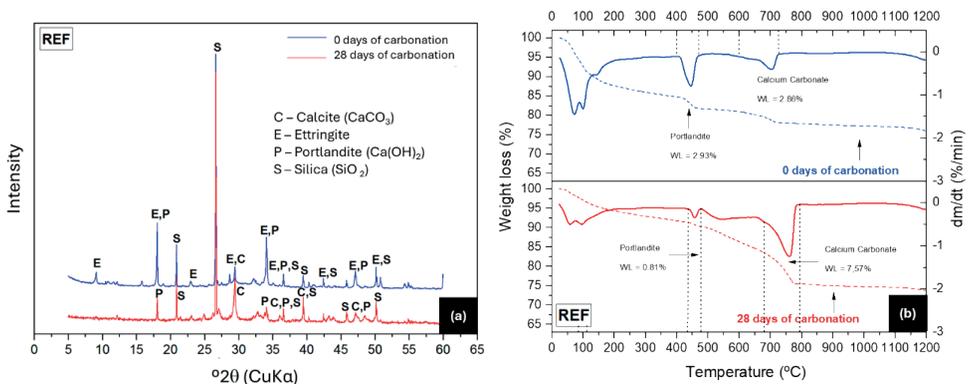


Figure 4. (a) XRD patterns and (b) TGA results of the REF sample

Fig. 4b shows that the weight loss (WL) due to the decomposition of portlandite and calcite reduces and increases after carbonation, respectively. This shows that carbonation is taking place as portlandite is converted into calcite. The results also reveal the permanence of peaks and thermal events related to C-S-H, which may indicate the preferential reaction of CO<sub>2</sub> with calcium hydroxide. This reaction, according by Del Bosque et al. (2020), occurs because thermodynamically it has priority over the decomposition of C-S-H.

In the S40 samples, the XRD patterns also indicated that the intensity of the portlandite peaks decreased, and the calcite phase appeared after carbonation, as can be seen in Fig. 5a. Carbonation was also indicated in the hydrated aluminates, as these compounds were present in greater quantities due to the incorporation of SCBA. It can also be seen that different compounds are formed, such as hydrated calcium silicoaluminate.

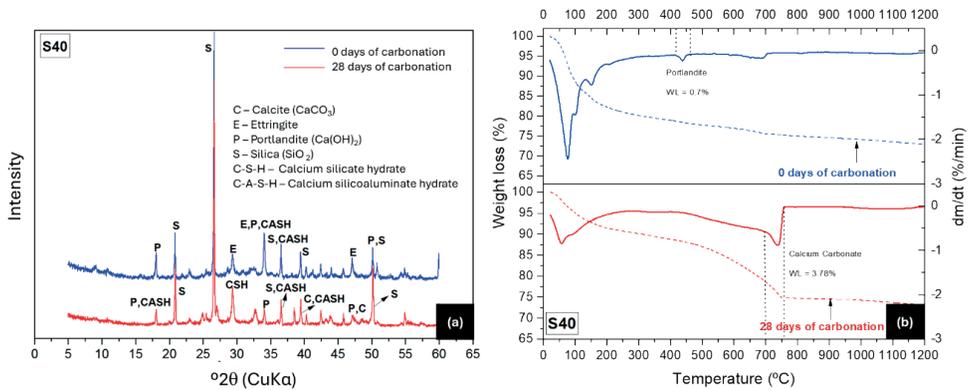


Figure 5. (a) XRD patterns and (b) TGA results of the S40 sample

The TGA results shown in Fig. 5b followed the same trend as the XRD results. There was a reduction in the loss of mass in the aluminate and portlandite zones, as well as a considerable increase in the weight loss associated with the decomposition of calcium carbonate after the carbonation process.

For the S40L10 sample, the behavior was similar to that of the S40 sample, since there was a reduction in the portlandite and aluminate peaks and, after carbonation, calcite formation, as shown in Fig. 6a.

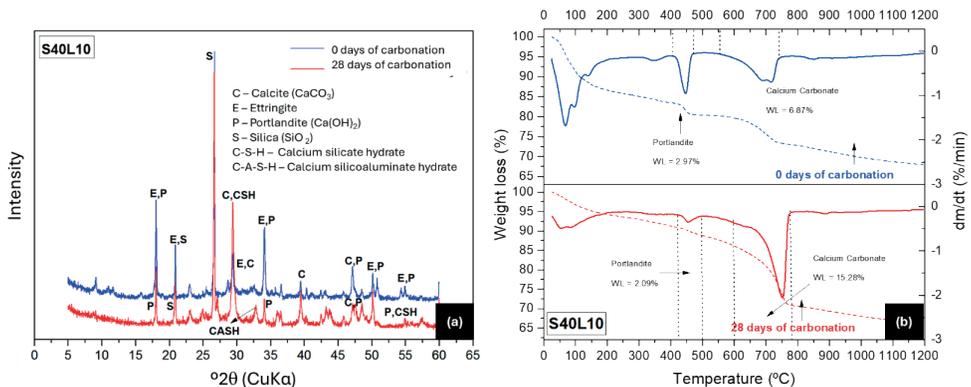


Figure 6. (a) XRD patterns and (b) TGA results of the S40L10 sample

The XRD patterns also revealed the presence of the vaterite phase, an unstable crystal formed at the beginning of calcite formation, indicating that the carbonation reaction is taking place. However, the presence of HL increased the intensity of the portlandite peaks compared to S40, indicating greater formation of this crystal.

This greater amount of portlandite resulted in greater production of calcium carbonates due to greater weight loss compared to sample S40, as shown in Fig. 6b. The addition of HL, therefore, together with the lower reactivity of SCBA may explain why the carbonation of sample S40L10 was higher than that of S40. Thus, portlandite was available throughout the cementitious matrix and because it reacted easily with CO<sub>2</sub> it allowed carbonation to progress. It is important to note that this may have been facilitated by the greater porosity of the mixtures with SCBA, since the mechanical strength of the mortars with these SCMs was lower than that of the mortars with RHA and MK, as will be discussed below.

In the sample with RHA incorporation (Fig. 7a), the results showed that, even at 0 days, the intensity of the portlandite peaks is low, there is a greater quantity and intensity of the C-S-H peaks, compared to the previous samples, and there is also formation of hydrated calcium silicoaluminates. These three factors can be attributed to the greater reactivity of RHA.

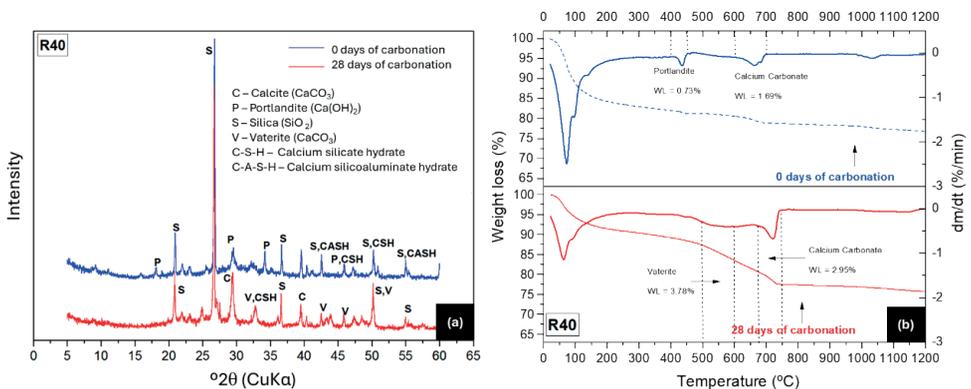


Figure 7. (a) XRD patterns and (b) TGA results of the R40 sample

The intensity of the calcite peaks is also low, indicating that the consumption of portlandite in the pozzolanic reaction reduces its availability to react with CO<sub>2</sub>. The TGA validates this claim, where there is a reduction in portlandite, an increase in calcite and the appearance of vaterite, as shown in Fig. 7b. However, the loss of mass related to the decomposition of hydrates such as C-S-H is reduced after carbonation, indicating that they were consumed in the reaction. This effect is undesirable since C-S-H is the main hydrated product of cement, which makes carbonation more aggressive.

The microstructural analysis of sample R40L10 can be seen in Fig. 8a and Fig. 8b. The results show behavior similar to that of sample R40, but the intensity of the calcite peaks is significantly higher (Fig. 8a). This proves that the presence of HL favors the formation of both calcite and vaterite, as occurred in sample S40L10. The presence of HL causes carbonation to take place over a longer period, as there are lower intensity peaks in the vaterite phase. The TGA results revealed an increase in mass loss related to calcite decomposition, proving that carbonation has occurred (Fig. 8b).

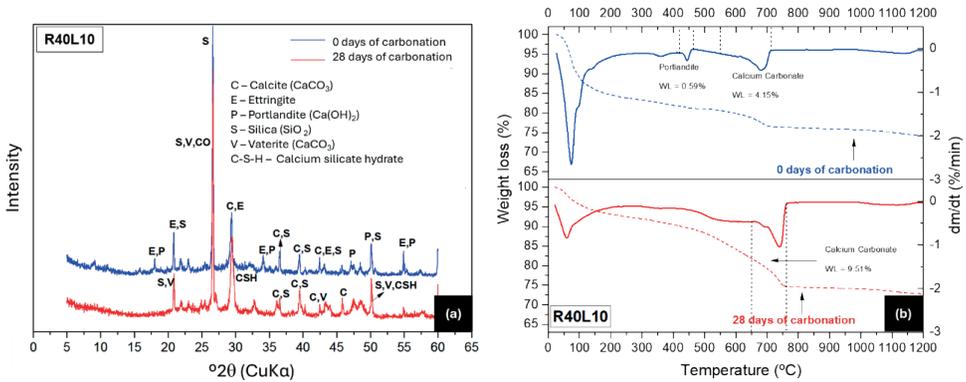


Figure 8. (a) XRD patterns and (b) TGA results of the R40L10 sample

Fig. 9a shows that the diffractogram of the sample incorporating MK (M40) has few peaks related to portlandite, which indicates that this hydrated product is consumed by the pozzolanic ratio. In this mixture, the peaks of this crystal are less intense, which may indicate an even smaller amount. This result can be attributed to the greater reactivity of MK compared to the other SCMs. In addition, the XRD results also revealed the presence of new aluminates, due to the composition of MK. As the availability of portlandite is reduced by the pozzolanic reaction, C-S-H becomes the main target for reacting with  $\text{CO}_2$ . This hypothesis can be observed at  $37^\circ 2\theta$  since the C-S-H is all converted into calcite.

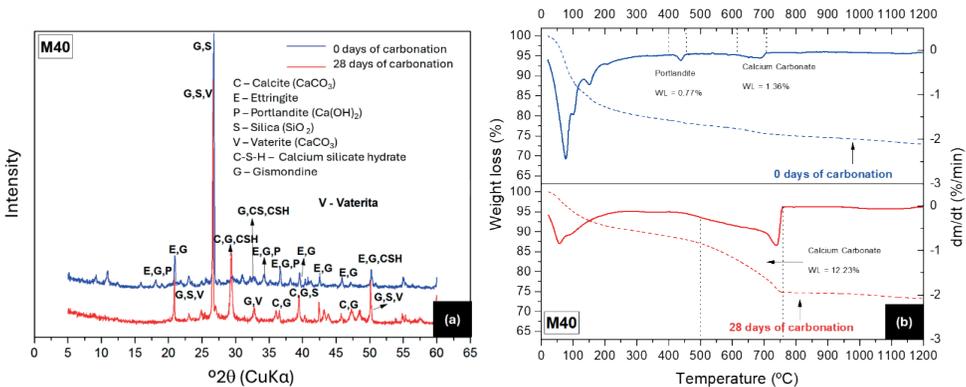


Figure 9. (a) XRD patterns and (b) TGA results of the M40

The results of the microstructural analysis of sample M40L10 follow the same trend as the results of sample R40L10, as shown in Fig. 10a. It was observed that the intensity of the peaks associated with calcite is greater due to the presence of HL. Vaterite is also present, again indicating that HL contributes to the development of carbonation reactions. However, in the samples with MK, there is greater carbonation of the hydrated aluminates due to the composition of these SCMs. TGA also showed that the thermal event associated with the decomposition of aluminates does not appear in the carbonated sample (Fig. 10b).

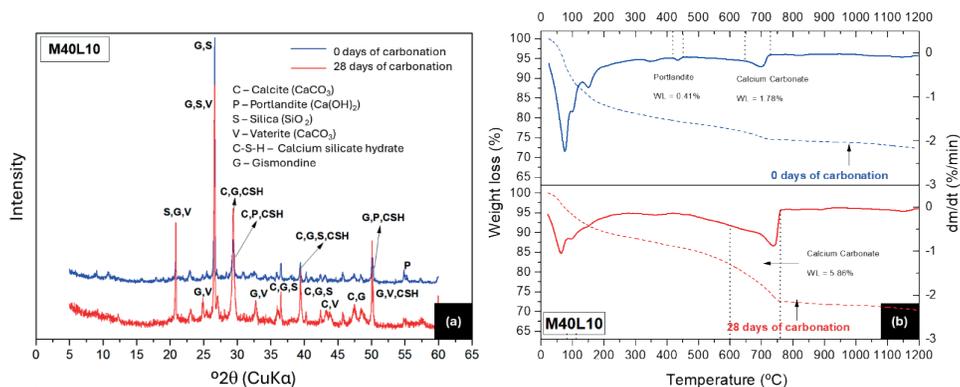


Figure 10. (a) XRD patterns and (b) TGA results of the M40L10

These results show that the addition of HL favors the development of the carbonation reaction. However, the  $\text{CO}_2$  penetration depth results show that the samples with RHA and MK have equivalent values with and without the addition of HL. This shows that the negative effect of HL is greater when the SCMs have low reactivity, as is the case with SCBA.

## $\text{CO}_2$ Penetration depth

The samples were inserted into the carbonation chamber and at 3, 7, 14 and 28 days they were removed to measure the depth of carbonation using the phenolphthalein spray technique. The results of this quantitative analysis of  $\text{CO}_2$  penetration in the samples can be seen in Fig. 11. In general, the results showed that the carbonation front of the mortars with the SCMs is smaller compared to the reference mortar (REF) at all ages, except for sample S40. The reason for this is that due to the pozzolanic reaction of the SCBA, the portlandite content is reduced and, as a result, the pH of the solution decreases and  $\text{CO}_2$  penetration is greater. There is also the possibility that there was a drop in  $\text{CO}_2$  concentration inside the chamber, which affected the results and should therefore be disregarded.

On the other hand, the mortars with RHA had the lowest carbonation depths than the mortars with MK. This result is consistent with the compressive strength results, indicating that the 40% mass replacement of RHA contributes to obtaining a more cohesive matrix. In addition, the results for the MK mortars, with and without the addition of HL, were similar, indicating that they can also be used in this proportion of cement substitution.

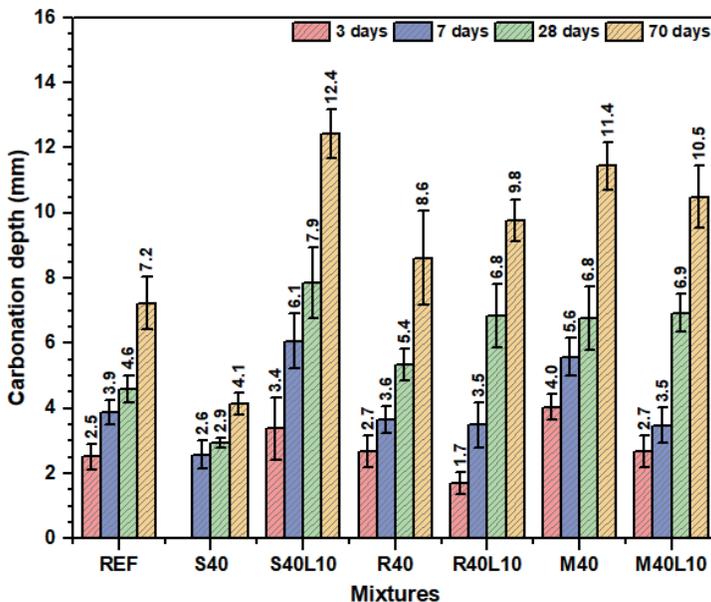


Figure 11. Depth of carbonation (mm) of mortars with SCMs and with the addition of HL

With regard to the effects of adding HL, it was observed that the addition of HL to the mortars with RHA and SCHA resulted in an increase in the depth of carbonation, while there was no significant influence on the mortars with MK. This indicates that the addition of HL not only raises the alkaline reserve, but also increases the rate of carbonation of the mortars.

However, it is important to note that all the mortars had a penetration depth of less than 25 mm. This value is the minimum cover for structural concrete in Brazil, according to the standards established in ABNT NBR 6118 (2023). Therefore, this physical barrier of the cover (space between the outer face of the structural element and the steel) is already efficient and validates the use of these materials since it helps to prevent corrosion.

## Compressive strength

The results of the compressive strength tests of the mortars at 3, 7, 28 and 70 days of hydration are shown in Fig. 12. The reference sample (REF) showed the best results due to its higher cement content. However, the mortars incorporating RHA and MK showed results close to those of the REF mortar, which indicates the viability of using these SCMs. The reason for this behavior is due to the reactivity of these materials and, therefore, their ability to react with the calcium hydroxide released by cement hydration and result in the formation of additional C-S-H. As a result, mechanical performance is improved.

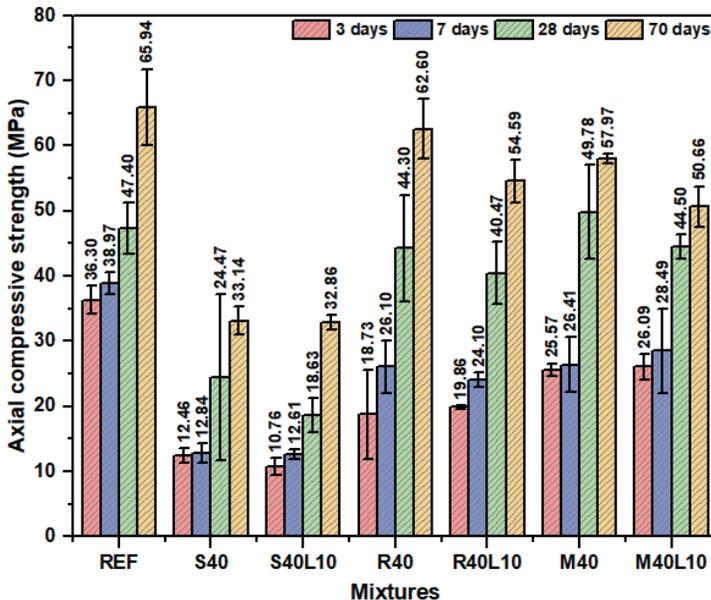


Figure 12. Compressive strength of mortars with SCBA, RHA, MK and without HL.

However, the SCBA mortars showed lower results than the other mortars, indicating that the low reactivity of these SCMs is the main factor responsible for this behavior.

## CONCLUSIONS

This study evaluated the effects of incorporating different types of supplementary cementitious materials (SCMs), including metakaolin (MK), rice husk ash (RHA) and sugar cane biomass ash (SCBA), as well as the addition of hydrated lime (HL), on the carbonation resistance of mortars intended for self-compacting concrete (SCC). The following conclusions can be drawn from the results.

- In the microstructural analysis, either by XRD or TGA, the results revealed that there was a consumption of Portlandite and an increase in calcium carbonate after 28 days of carbonation. This behavior remained uniform in all the samples.
- The reference mix (REF) was the only one in which calcium hydroxide remained even after the full period in the accelerated carbonation chamber, revealing that the cement is highly resistant to degradation caused by  $\text{CO}_2$ .
- In the REF, it was also observed that in the XRD patterns, the peaks associated with C-S-H remained even after the carbonation process, confirming that this process significantly involves calcium hydroxide. On the other hand, the opposite behavior was observed in the samples with SCMs, as the intensity of the C-S-H peaks decreased after 28 days of carbonation, indicating that due to the reduced availability of calcium hydroxide (consumed by the pozzolanic reaction), this phase also tends to carbonate.

- The depth of carbonation in all the mixtures did not reach the minimum 25 mm of cover as established in the normative standards. In practice, this prevents the carbonation front from reaching the steel during the useful life of structural elements built with SCC derived from these mortars.
- All the mixtures had good compressive strengths, with values above 30 MPa at 28 days. However, only the mortars with RHA and MK showed compressive strength values close to those of the REF mortar.

## REFERENCES

ABNT. **NBR 13279** - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ABNT. **NBR 13281** - Argamassa para Assentamento e Revestimento de Paredes e Tetos. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ANJOS, M. A. S. **Adição do resíduo de biomassa da cana-de-açúcar em pastas para cimentação de poços petrolíferos produtores de óleos pesados**. 2009. 172 f. Tese (Doutorado em Processamento de Materiais a partir do Pó; Polímeros e Compósitos; Processamento de Materiais a part) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

ANJOS, Marcos A. S. et al. Effect of high volume fly ash and metakaolin with and without hydrated lime on the properties of self-compacting concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 27, p. 100985, 2020.

APAZA MEDINA, Engler. **Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento Portland e hidróxido de cálcio**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, University of São Paulo, São Paulo, 2011. doi:10.11606/D.3.2011.tde-12032012-120653. Acesso em: 2024-06-10.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12653** - Materiais Pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5751** - Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

DEL BOSQUE, IF Sáez et al. Carbonation of concrete with construction and demolition waste based recycled aggregates and cement with recycled content. **Construction and Building Materials**, v. 234, p. 117336, 2020.

DINIZ, Hugo A. A. et al. Effects of the use of agricultural ashes, metakaolin and hydrated-lime on the behavior of self-compacting concretes. **Construction and Building Materials**, v. 319, p. 126087, 2022.

DINIZ, Hugo Alessandro Almeida. **Estudo das propriedades mecânicas e dos parâmetros de durabilidade de concretos autoadensáveis com elevados teores de adições minerais submetidos à carbonatação**. 2018. 159f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

DOSSCHE, Charlotte et al. A plant based LCA of high-strength prestressed concrete elements and the assessment of a practical ecological variant. **Cement and Concrete Composites**, v. 73, p. 192-202, 2016.

- ELSALAMAWY, Mona; MOHAMED, Ashraf R.; KAMAL, Eslam M. The role of relative humidity and cement type on carbonation resistance of concrete. **Alexandria Engineering Journal**, v. 58, n. 4, p. 1257-1264, 2019.
- FAPOHUNDA, Christopher; AKINBILE, Bolatito; SHITTU, Ahmed. Structure and properties of mortar and concrete with rice husk ash as partial replacement of ordinary Portland cement—A review. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 6, n. 2, p. 675-692, 2017.
- JAMIL, M. et al. Physical and chemical contributions of Rice Husk Ash on the properties of mortar. **Construction and Building Materials**, v. 128, p. 185-198, 2016.
- JOSHAGHANI, Alireza; MOEINI, Mohammad Amin. Evaluating the effects of sugar cane bagasse ash (SCBA) and nanosilica on the mechanical and durability properties of mortar. **Construction and building materials**, v. 152, p. 818-831, 2017.
- KANNAN, V. Strength and durability performance of self compacting concrete containing self-combusted rice husk ash and metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 160, p. 169-179, 2018.
- LE, Ha Thanh; LUDWIG, Horst-Michael. Effect of rice husk ash and other mineral admixtures on properties of self-compacting high performance concrete. **Materials & Design**, v. 89, p. 156-166, 2016.
- MIKULČIĆ, Hrvoje et al. Reducing greenhouse gasses emissions by fostering the deployment of alternative raw materials and energy sources in the cleaner cement manufacturing process. **Journal of cleaner production**, v. 136, p. 119-132, 2016.
- OLLIVER, J.; VICHOT, A. **Durabilidade do concreto—Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. Oswaldo Cascudo e Helena Carasek (Organizadores). 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
- PERLOT, Céline; ROUGEAU, Patrick; DEHAUDT, Sylvain. Slurry of metakaolin combined with limestone addition for self-compacted concrete. Application for precast industry. **Cement and concrete composites**, v. 44, p. 50-57, 2013.
- QIU, Qiwen. A state-of-the-art review on the carbonation process in cementitious materials: Fundamentals and characterization techniques. **Construction and Building Materials**, v. 247, p. 118503, 2020.
- SAFIUDDIN, Md; WEST, J. S.; SOUDKI, K. A. Hardened properties of self-consolidating high performance concrete including rice husk ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 9, p. 708-717, 2010.
- SCRIVENER, Karen L.; JOHN, Vanderley M.; GARTNER, Ellis M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry. **Cement and concrete Research**, v. 114, p. 2-26, 2018.
- SUA-IAM, Gritsada; MAKUL, Natt. Effect of incinerated sugarcane filter cake on the properties of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 130, p. 32-40, 2017.
- TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. 2<sup>a</sup> ed. Thomas Telford Publishing, Londres, 1997. <https://doi.org/10.1680/cc.25929>.
- UYSAL, Mucteba; YILMAZ, Kemalettin. Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete. **Cement and Concrete composites**, v. 33, n. 7, p. 771-776, 2011.

# FABRICAÇÃO DE PEÇAS METÁLICAS POR MANUFATURA ADITIVA EM AÇOS COM BAIXO TEOR DE CARBONO

*Data de aceite: 01/07/2024*

**Henrique Cechinel Casagrande**

**Anderson Daleffe**

**Carlos Antônio Ferreira**

**Daniel Fritzen**

**Gilson De March**

**Jovani Castelan**

**Lirio Schaeffer**

**RESUMO:** Novas tecnologias surgem com o objetivo de melhorar processos de fabricação, bem como tornar os setores produtivos mais competitivos. No entanto, no último século, um novo método surgiu dentro da indústria 4.0 denominada de “Manufatura Aditiva”, ou MA. Neste novo contexto, as peças são impressas com objetivo de economizar matéria-prima e, desenvolver geometrias complexas, onde outras técnicas de fabricação não possuem essa habilidade. Dessa forma, uma máquina híbrida foi desenvolvida, juntando um aparelho de soldagem a arco e um equipamento controlado por computador (CNC). A máquina de soldagem

é da fabricante IMC, modelo DIGIplus A7 semiautomática, e o equipamento responsável por realizar os movimentos de deposição é um dispositivo de fabricação interna com deslocamentos em três eixos. O material utilizado para confecção dos corpos de prova foi o arame de soldadura ER70S-6, material este caracterizado por sua grande comercialização na indústria devido sua aplicabilidade e custo benefício. Dessa forma, paredes foram impressas para ensaio mecânico de tração em três sentidos em relação a deposição; 0°, 45° e 90°, para avaliação anisotrópica do material, bem como análise microestrutural e de microdureza. A avaliação microestrutural apresentou resultado característico de um aço com baixo teor de carbono, e com estrutura uniforme livre de porosidade. Em contra partida, o ensaio de tração mostrou um material de característica dúctil e com tensões máximas entre 555 a 530 MPa. Já no ensaio de microdureza Vickers, o material apresentou uniformidade no perfil de dureza, apresentando baixo desvio padrão e com durezas entre 150,5 á 160 HV.

**PALAVRAS-CHAVE:** Manufatura aditiva, soldagem a arco, indústria 4.0, aço carbono.

## INTRODUÇÃO

A necessidade é conhecida como a mãe das invenções. Muitos pesquisadores descobrem novos modelos de trabalho, novas tecnologias, entre outras ideias, utilizando-se da necessidade de evolução do ser humano em seu meio existencial. Assim sendo, a indústria metal mecânica evolui a cada dia e se torna mais competitiva no mercado de trabalho que exige ao extremo produtos de qualidade, custo competitivo e sustentabilidade. Em contra partida o processo de produção utilizando-se a técnica de manufatura aditiva ganhou espaço no mercado, pois reduz o desperdício de material e desenvolve peças de grande complexidade. Essa técnica, foi desenvolvida no ano de 1981, no Japão e cresce a cada ano [1]

Este método utiliza a combinação de material soldado a arco e matéria-prima. Pode ser chamado de Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) e ser implantado nas soldagens a arco de metal a gás (GMAW), ou até mesmo em soldagens com eletrodo de tungstênio (GTAW) e, a arco por plasma (PAW). Ressalta-se a quantidade de material depositado, pois com este método é possível ter altas taxas de deposição, entretanto, perde em poder de precisão e estética [2,6,8].

Salienta-se o uso de metais tais como titânio e aços, que possuem uma grande demanda de fios padrões e boas taxas de deposições, contudo, estudos aplicando alumínio ganham força no mercado. Não obstante, essa técnica tem suas desvantagens, tais como; uma elevada entrada de calor, resultando em tensões residuais e distorções, bem como menor precisão e rugosidade, que ao final do processo se torna necessário uma etapa de usinagem [3,4,7].

Para a confecção das peças, é necessário realizar teste de deposição de matéria-prima, o que se torna essencial para uma boa deposição e uniformidade entre as camadas depositadas. Parâmetros como taxa de alimentação do arame, velocidade de movimento da tocha, bem como intensidade de corrente e tensão [5].

Portanto, através da técnica de WAAM, ou fabricação aditiva por arco de arame, peças foram impressas para caracterização mecânica, avaliação anisotrópica do material, bem como avaliação química da composição do arame em estudo.

## MÁQUINA DE MANUFATURA ADITIVA

O equipamento utilizado é uma junção entre máquina de soldagem a arco e dispositivo com coordenadas CNC (Centro Numérico Computadorizado). A máquina de soldagem é da fabricante IMC sendo seu modelo DIGIplus A7. Este equipamento por sua vez possui uma ferramenta de aquisição de dados capaz de fornecer em tempo real os parâmetros utilizados durante o processo de fabricação das peças. A Figura 1, detalha o equipamento utilizado no processo de soldagem.

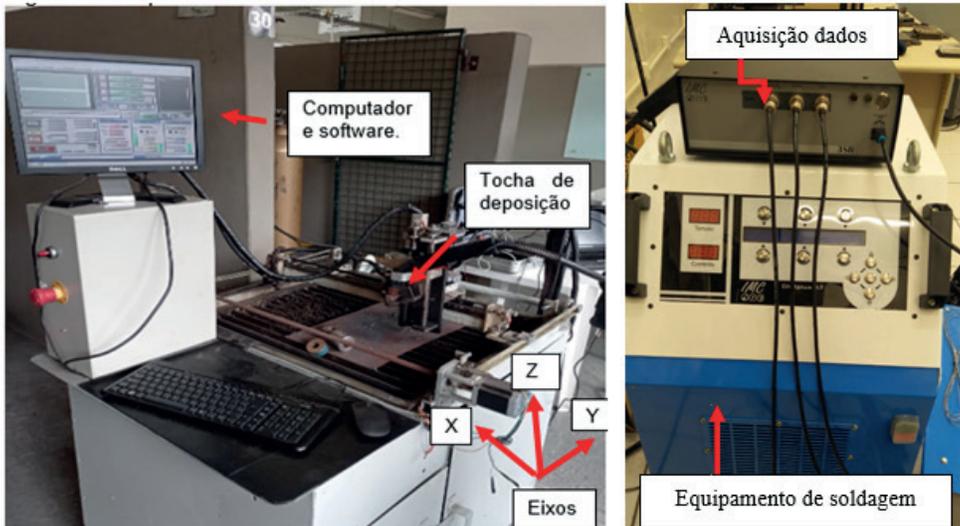


Figura 1: Equipamento de manufatura aditiva. Do autor (2024).

O software utilizado para programar é o MACH 3, em linguagem de programação G. O programa é feito de forma manual, pois o objetivo inicial é entender o comportamento metalúrgico das peças depositadas, e não a fabricação de peças com grande complexidade. Assim, ao equipamento de coordenadas CNC possui movimentação em três eixos, cognominado de X, Y e Z, conforme Figura 1.

### Arame ER70S-6

O material para o presente estudo foi o arame de aço com baixo teor de carbono ER70S-6 com 1 mm de espessura e com 15 kg fornecido em bobina. Este material é regido pela norma AWS 5.18. Para caracterização dos elementos químicos presentes na estrutura, foi realizado o ensaio de espectrometria de emissão óptica, conforme Tabela 1.

Composição química	Valores % em peso
Carbono (C)	0,104
Silício (Si)	0,657
Manganês (Mn)	1,259
Fósforo (P)	0,014
Enxofre (S)	0,010
Cromo (Cr)	0,020
Molibdênio (Mo)	0,014
Níquel (Ni)	0,014
Cobre (Cu)	0,093
Ferro (Fe)	bal.

Tabela 1: Composição química arame AWS ER70S-6.

Fonte: Do autor (2024).

Conforme Tabela 1, o nível de carbono é considerado baixo, no entanto outros elementos se fazem presentes na estrutura, tais como Silício com 0,657 % em peso, bem como o manganês com 1,259 %.

## Parâmetros de soldagem

Conforme citado anteriormente, para produção das amostras foi utilizado a máquina de soldagem da fabricante IMC, com a ferramenta de aquisição de dados SAP3RS. Contudo, essa ferramenta é capaz de obter os seguintes parâmetros: corrente (A), tensão (V), velocidade de arame (m/min.), vazão do gás de proteção (L/min.), entre outros. A Figura 2 detalha os gráficos obtidos na impressão das amostras.

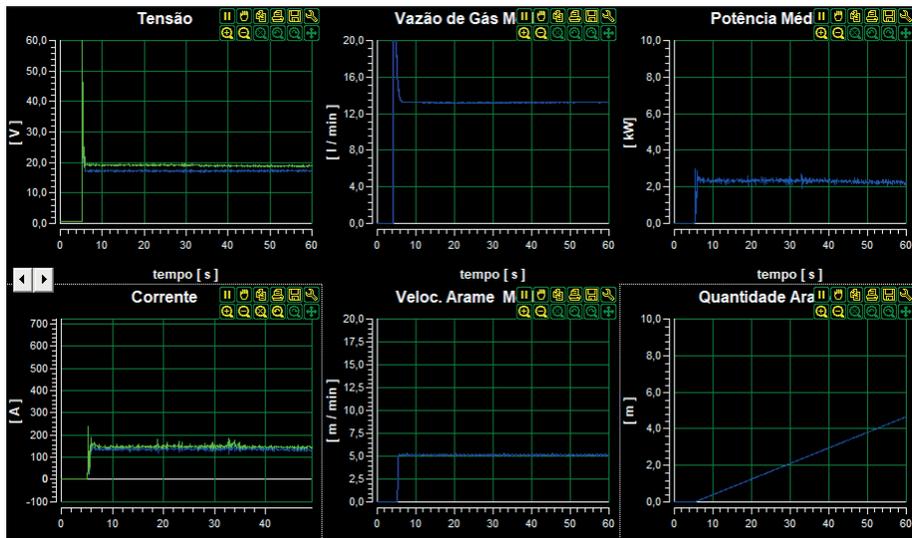


Figura 2: Aquisição dos parâmetros de soldagem. Do autor (2024).

Os valores da Tabela 2 são referentes aos resultados da Figura 2. Os resultados apresentados são a média aritmética.

<b>Composição química</b>	<b>Valores</b>
Corrente (A)	123
Tensão (V)	17,4
Velocidade gás (L/min.)	13,4
Velocidade arame (m/min.)	5,1
Potência (KW)	2,1
Quantidade arame (m)	4,7

Tabela 2: Parâmetros de soldagem arame ER70S-6.

Fonte: Do autor (2024).

Os parâmetros utilizados na Tabela 2 fazem referência a fabricação de uma parede de soldagem. O gás utilizado como barreira protetiva foi uma mistura entre argônio (75%) e dióxido de carbono (25%), caracterizado como processo de soldagem MAG (Metal Ativo Gás). Já o material utilizado como substrato é uma chapa de aço SAE 1020 com dimensões de 150 x 75 x 6,35 mm.

### **Obtenção de peças para ensaio mecânico de tração**

Peças manufaturadas foram desenvolvidas para analisar as camadas depositadas durante a impressão. Para isso, foram produzidas três paredes com aproximadamente 6 mm de largura, 120 mm de comprimento e 120 mm de altura. Após a impressão, essas paredes foram usinadas e retificadas utilizando-se a fresadora Romi U30, e a retífica plana Mello P36, respectivamente. Essa etapa é crucial para validar a homogeneidade em diferentes direções e para avaliar as tensões de trabalho, como tensão de escoamento, tensão máxima e alongamento, realizando assim uma análise anisotrópica. Para o aço carbono, esse tipo de ensaio segue a norma NBR ISO 6892. A Figura 3 traz as paredes impressas.

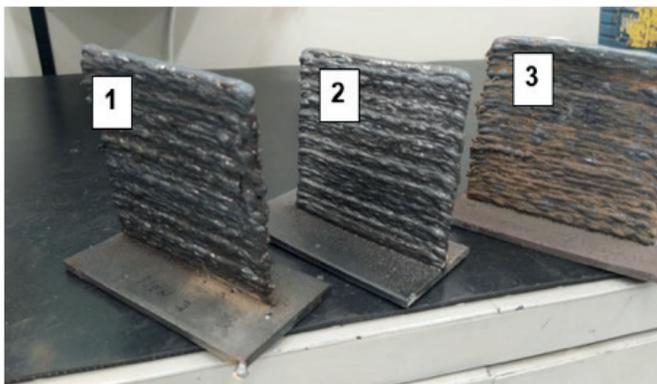


Figura 3: Paredes impressas com manufatura aditiva.

O Objetivo de produzir três paredes está ligado com a avaliação anisotrópica do material. Dessa forma, foram retirados seis corpos de prova na amostra de 0° e 90°. No entanto, para a parede de corte a 45° foi possível retirar apenas 5 amostras devido as limitações geométricas. A Figura 4 detalha os corpos de prova para ensaio de tração. O ensaio foi realizado em uma máquina de ensaios universal EMIC com carga de até 100 KN, e velocidade de ensaio com 5 mm/min.

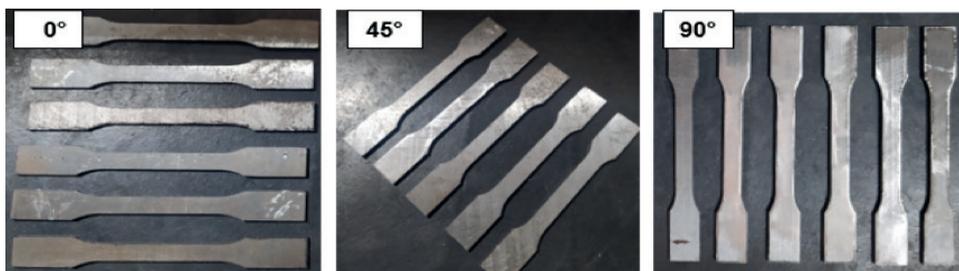


Figura 4: Corpos de prova para ensaio mecânico de tração.

A Tabela 3 detalha a quantidade de camadas depositadas, bem como as dimensões finais das paredes.

Parâmetros	Valores
Número de camadas	31
Altura efetiva	118 mm
Altura média camads	3,74 mm/camada
Largura média camadas	5,53 mm
Largura após usinagem	2 mm
Fator de eficiência	36,17 %

Tabela 3: Carecterísticas dos cordões

Fonte: Do autor (2021).

### *Análise metalográfica*

As amostras foram submetidas a ensaio microestrutural através do microscópio Olympus modelo SC30, conforme norma ABNT NBR 15454. Conforme discutido, o processo de soldagem a arco pode apresentar porosidade, que quando exposto a esforços mecânicos podem ocorrer ruptura prematura.

### *Ensaio de microdureza Vickers*

Para verificar a homogeneidade da dureza das paredes estudadas, foi conduzido um ensaio de dureza Vickers utilizando um microdurômetro modelo HMV-2TADW da marca SHIMADZE®. O estudo envolveu a realização de 17 penetrações ao longo de um perfil no sentido longitudinal (maior comprimento) e 8 penetrações no sentido transversal. Cada penetração foi realizada aplicando uma força de 4,903 N e uma distância de 1,5 mm. Os resultados foram analisados utilizando-se a Equação 1.

$$HV = \frac{1,8544 \times F}{d^2}$$

Onde:

Hv: Hardness Vickers (HV);

F: Carga aplicada (Kg);

d<sup>2</sup>: Distância entre as diagonais (mm).

## **ANÁLISES E RESULTADOS**

### **Análise de metalografia**

Este ensaio detalhou a microestrutura do material em estudo. A Figura 5 traz a metalografia que é composta de ferrita com a cor clara, apresentada como FE, a matriz também possui a perlita com cor escura denominada de PE, e a análise ainda apresentou perlita de contorno de grão PC.

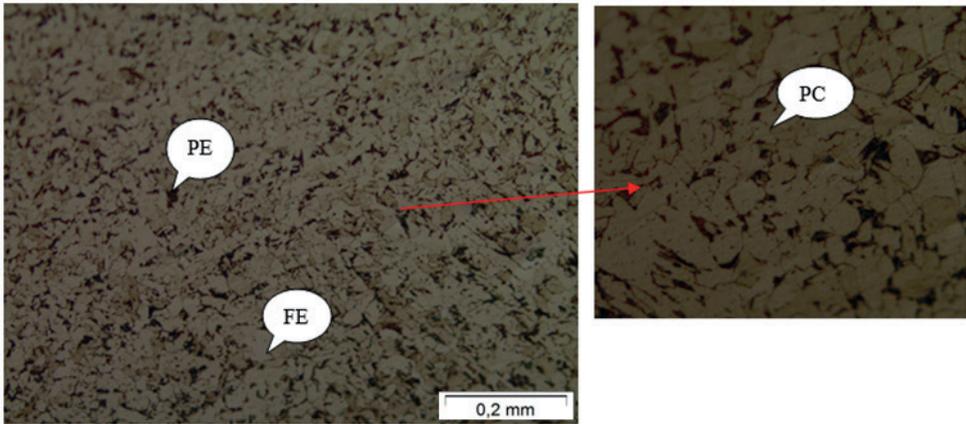


Figura 5: Metalografia das amostras. Do autor (2024).

### Ensaio mecânico de tração

O ensaio mecânico de tração foi realizado em três sentidos para avaliação anisotrópica. A Figura 6 detalha tal ensaio. Nota-se um limite de escoamento visível, característico de um material dúctil.

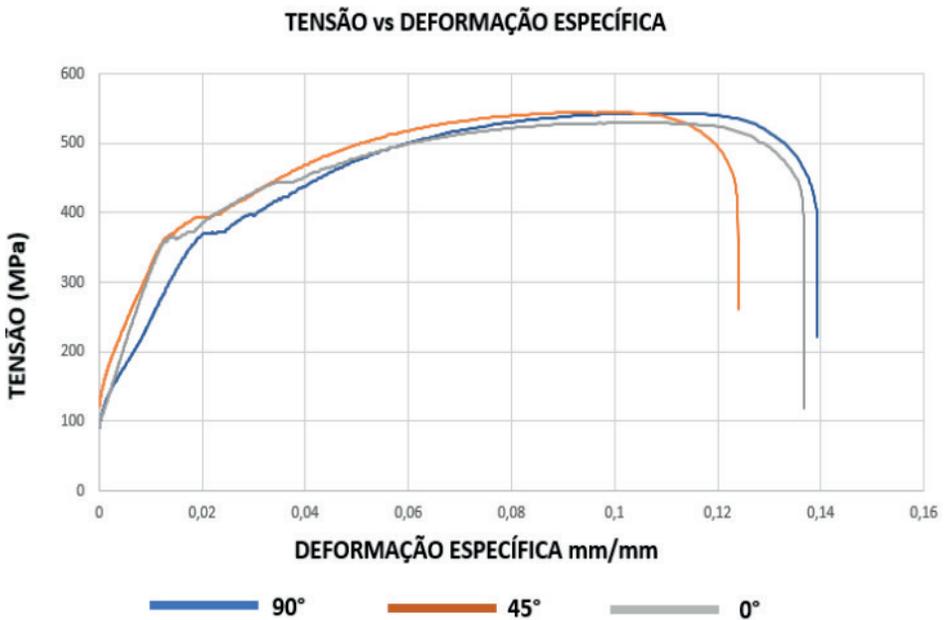


Figura 6: Ensaio mecânico de tração. Do autor (2024).

A tensão máxima suportada foi de 550 MPa em sentido de 90° em relação ao substrato de deposição. Contudo, não houve uma variação expressiva em relação aos três sentidos, conforme apresentado na Tabela 4.

Ensaio	Tensão máxima (MPa)	Tensão escoamento (MPa)	
Tração 90°	550	364	0,139
Tração 45°	544	390	0,124
Tração 0°	530	357	0,134

Tabela 4: Ensaio de tração em 0°, 45° e 90°

Fonte: Do autor (2024).

O ensaio a 45° mostrou com uma região de maior elasticidade, e apresentou o valor de limite de escoamento de 390 MPa, o valor maior entre os três sentidos. Ainda assim, o ensaio a 90° obteve a maior deformação específica, e apresentou 12% de deformação a mais em comparação ao resultado da amostra a 45°.

### Ensaio de microdureza Vickers

Para o ensaio na longitudinal a dureza ficou com uma média de 160 HV, e com um desvio padrão de 7,46 HV. Nota-se um baixo desvio padrão entre as endentações, conforme visualizado na Figura 7.

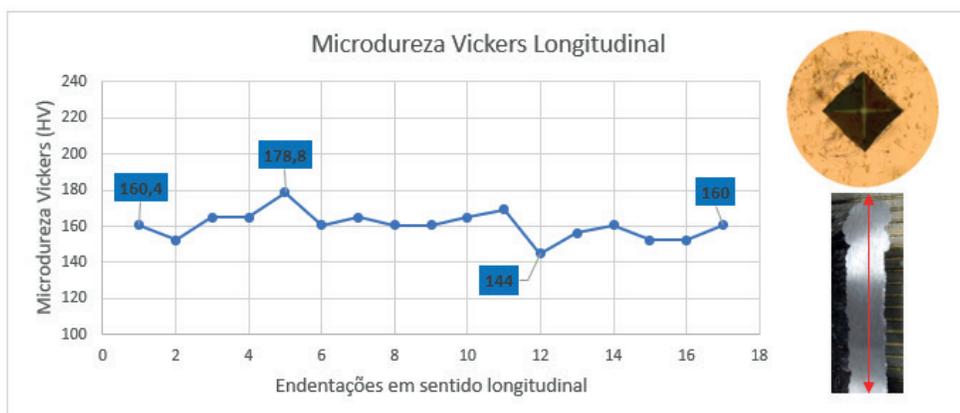


Figura 7: Ensaio de microdureza Vickers em sentido longitudinal. Do autor (2024).

No entanto, os resultados para o ensaio de microdureza em sentido transversal apresentaram uma dureza menor comparado ao resultado do sentido longitudinal. A Figura 8 detalha como ficou o respectivo gráfico.

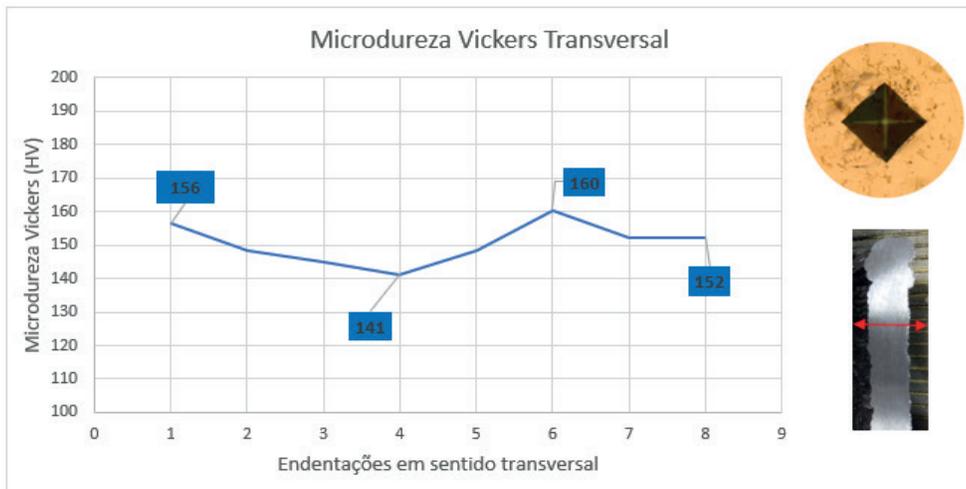


Figura 8: Ensaio de microdureza Vickers em sentido transversal. Do autor (2024).

A microdureza transversal possui média de 150,5 HV e desvio padrão de 6,15 HV. e apresenta 10 HV a menos em comparação com os resultados do sentido longitudinal. No entanto, vale ressaltar que para o sentido longitudinal por possuir uma região maior, foram realizadas 17 endentações, e para o sentido transversal 8 endentações. Outro motivo que pode ter influenciado no resultado é a troca térmica entre parede e ar atmosférico, sendo que para o ensaio no sentido longitudinal o perfil de dureza foi realizado ao longo do centro da parede, onde foi o último local a resfriar.

## CONCLUSÃO

Portanto, após análise dos resultados conclui-se:

Este método se mostra promissor pois apresentou boa uniformidade em sua estrutura metalográfica. A matriz estrutural é composta de ferrita e perlita, sem apresentar grãos grosseiros característicos da área afetada pelo calor quando um material é soldado acima da temperatura crítica entrando na fase austenítica. Vale salientar que cada cordão depositado sofreu reaquecimento e conseqüentemente recozimento, influenciando em sua estrutura.

O ensaio de microdureza em sentido longitudinal obteve um desvio padrão baixo, com apenas 7,46 HV e uma média de 160 HV, contudo, o ensaio realizado em sentido transversal a deposição obteve uma dureza menor na extremidade do material (parede externa), e ficou com uma média de 150,5 HV com 6,15 HV de desvio padrão. A microdureza e metalografia apresentaram valores que comparado a literatura ficam com características entre um aço SAE 120 e SAE 1030.

O ensaio de tração obteve resultados com pequena variância, o que caracteriza uma penetração com eficiência entre as deposições dos cordões. As amostras ensaiadas a 45° se mostraram com menor deformação específica, com 12% a menos em comparação ao ensaio de 90° que teve maior deformação.

## 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.

## REFERÊNCIAS

1. Um pouco da história da manufatura aditiva. Usinagem Brasil. São Paulo, 2018. Disponível em: <<http://www.usinagem-brasil.com.br/13122-um-pouco-da-historia-da-manufatura-aditiva/pa-5/>> Acesso em: 04 abril 2021.
2. TABERNERO, Iván; PASKUALA, Amagoia; ÁLVAREZB, Pedro; SUÁREZCB, Alfredo. 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: 04 de abril de 2021.
3. HU, Daijun; GUO, Zixu; GRILLI, Nicoló; TAY, Aloysius; LU, Zhen; YAN, Wentao. **Understanding the strain localization in additively manufactured materials: Micro-scale tensile tests and crystal plasticity modeling**. International Journal of Plasticity 177 (2024). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0749641924001086>>. Acesso em: 17 de junho de 2024.
4. CASTRO, Maria Inês; SILVA. **Study of Deposition Strategies of a Wire + Arc Additive Manufactured Component**. 2018. 64f. Thesis: Master of Science Degree in Materials Engineering. Técnico Lisboa, 2018. Disponível em: <[https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/844820067125611/74180\\_\\_Dissertacao.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/844820067125611/74180__Dissertacao.pdf)>.
5. ARTAZA, T.; ALBERDI, A.; MURUA, M.; GORROTXATEGIA, J.; FRIAS, J.; PUERTAS, G.; MELCHOR, M. A.; MUGICA, D.; SUÁREZ, A. Design and integration of WAAM technology and in situ monitoring system in a gantry machine. **Elsevier**. Pontevedra, v.13, p. 778-785, junho 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978917308223>>> Acesso em: 17 de abril de 2021.
6. CAMPATELLI, Gianni; MONTEVECCHI, Filippo; VENTURINI, Giuseppe; INGARAO, Giuseppe; PRIARONE, Paolo. Integrated WAAMSubtractive Versus Pure Subtractive Manufacturing Approaches: An Energy Efficiency Comparison. 2018. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology . V. 7, p.1-11. (2020). Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s40684-019-00071-y>>. Acesso em: 09 abril de 2021.
7. XIAO, Jinrui; ZHANG, Yiteng; XIE, Xincheng; DING, Wenfeng; ZHAO, Zhuan; LIANG, Zhongwei. **Mechanical property improvement of wire-arc additive manufactured 06Cr19Ni9 steel based on ultrasonic strengthening grinding process**. ScienceDirect, Journal of Materials Research and Technology 30 (2024) 7969-7980. Disponível em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785424012274>>. Acesso em: 17 de junho de 2024.
8. LOPESA, Gustavo; FILHO, Demostenes; FERRARESI, Valtair. **Effect of interlayer temperature and cold wire addition in Wire Arc Additive Manufacturing on carbon steel**. Procedia Computer Science 232 (2024) 544–553. Disponível em:<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050924000541>>. Acesso em: 17 de junho de 2024.

# INUNDAÇÕES URBANAS: UM ESTUDO DE CASO EM SWMM NA LAGOA DO SAPO EM BATAYPORÃ - MS

Data de aceite: 01/07/2024

**Guilherme Mendes dos Santos**

Schettini Engenharia LTDA

**Ricardo Schettini Figueiredo**

Schettini Engenharia LTDA

**Lucas Mariano Medeiros**

Schettini Engenharia LTDA

**RESUMO:** Nos últimos anos a sociedade tem experienciado eventos hidrológicos extremos de precipitação mais intensos e recorrentes. A área de estudo apresenta em seu passado e presente diversos eventos de inundações. O evento pluviométrico ocorrido em 12 de outubro de 2022, apresentou altura de 120mm, deflagrando um cenário de inundação que causou significativa comoção por parte dos munícipes. A Lagoa do Sapo apresenta um relevo suscetível a ocorrência desta inundação, por esta localizada em uma depressão topográfica, onde todo escoamento superficial é direcionado para o local da lagoa. O presente estudo visa explorar as extensões das inundações na cidade através de 5 cenários de precipitação, buscando fornecer aos tomadores de decisão informações pertinentes para tratativa da

problemática na cidade. O *software* adotado foi o *Storm Water Management Modelo* (SWMM), a calibração do modelo foi pautada em uma metodologia simplificada por meio de duas abordagens, a primeira consiste na comparação da mancha de inundação simulada com os registros fotográficos do evento e a segunda em um próprio parâmetro do programa, erro de continuidade, esta abordagem foi adotada mediante a inexistência de dados coletados durante o evento de inundação. Com o modelo calibrado, foi possível estimar a quantidade de residências afetadas e as manchas de inundações para os diferentes cenários. A partir dos resultados deste trabalho, conclui-se que a região da Lagoa do Sapo necessita de intervenções hidráulicas em seu sistema de drenagem que visem retardar o escoamento superficial e que ampliem capacidade do extravasor existente.

**PALAVRAS-CHAVE:** Inundação urbana, simulação, drenagem urbana

**ABSTRACT:** In recent years, society has experienced increasingly intense and recurring hydrological events of heavy precipitation. The study area has a history and ongoing occurrence of various flood

events. The pluviometric event that took place on October 12, 2022, recorded a precipitation height of 120mm, triggering a flooding scenario that caused significant concern among the residents. The Lagoa do Sapó is in a topographical depression, making its terrain susceptible to such flooding, as all surface runoff is directed towards the lagoon. This study aims to explore the extent of flooding in the city through five precipitation scenarios, providing decision-makers with relevant information to address the issue in the city. The Storm Water Management Model (SWMM) software was utilized, and the model calibration was based on a simplified methodology employing two approaches. The first approach involved comparing the simulated flood extent with photographic records of the event, while the second approach utilized a program parameter, the continuity error, due to the lack of collected data during the flood event. With the calibrated model, it was possible to estimate the number of affected residences and the flood extents for different scenarios. Based on the results of this study, it is concluded that the Lagoa do Sapó region requires hydraulic interventions in its drainage system to delay surface runoff and enhance the capacity of the existing overflow outlets.

**KEYWORDS:** Urban flood, simulation, urban drainage.

## INTRODUÇÃO

O manejo e a drenagem das águas pluviais fazem parte da infraestrutura do complexo organismo urbano das cidades contemporâneas, exercendo papel fundamental para harmonia da aglomeração humana, principalmente em grandes centros urbanos e no meio ambiente.

A crescente ocupação das bacias hidrográficas altera significativamente suas características, resultando em um tempo menor de concentração e aumentando o volume escoado. Por mais que, no meio acadêmico, já seja difundida uma abordagem sustentável a respeito da drenagem urbana, muitos projetos e planejamentos ainda tem convicções desatualizadas (TUCCI *et al.*, 2014).

A metodologia tradicional é respaldada na captação e no transporte de maneira rápida e eficiente para diminuir os agravantes das chuvas no âmbito local, repassando a jusante seus efeitos. Entretanto, devido a expansão urbana, diversas áreas passam a sofrer com a chegada massiva de volumes d'água. (PINHEIRO E FRANK, 2003; BOTELHO, 2017).

Neste sentido, as simulações de eventos históricos podem fornecer dados úteis para o manejo das águas (SHAKTI, KAMIMERA E MISUMI, 2020). Por meio do mapeamento das inundações, é possível criar modelos para compreender o desdobramento das enchentes, que por sua vez servirão de base para políticas públicas, planejamento em situações de emergência/evacuação e para estimar danos (KOBAYASHI *et al.*, 2019).

Assim, é possível zonear áreas de risco para melhor aplicar os recursos públicos em um planejamento (HORA E GOMES, 2009). De acordo com Tucci *et al.* (2014), mensurar futuras situações em diferentes momentos de urbanização, pode fornecer soluções no planejamento da ocupação urbana, antevendo e minimizando os problemas de inundações

futuras, evitando assim despende grandes quantidades de investimentos em soluções tardias. Portanto, diversas cidades brasileiras têm aplicado o mapeamento de inundações (SOUZA, CRISPIM E FORMIGA, 2012; HIRATA *ET AL.*, 2013; GOERL, MICHEL E KOBIYAMA, 2017; SILVA, 2019).

De acordo com o Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres da UFSC (CEPED UFSC) (2013), o território brasileiro apresentou uma tendência ao aumento dos desastres naturais, no período de 1991 a 2012. O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) (2018) apresentam que, no censo de 2010, o país contava com cerca de 8,2 milhões de pessoas vivendo em áreas de risco de enchentes ou deslizamentos.

Ponto que reforça os dados apresentados pela UNESCO e UN-Water (2020), que as inundações globais e eventos extremos de precipitação aumentaram em mais de 50% nesta década, e agora estão ocorrendo em uma taxa quatro vezes maior do que em 1980.

Portanto, eventos de inundação urbana tendem a crescer em escala e quantidade, apontando para um futuro em que eventos que antes seriam pouco impactantes passam a tornar-se deflagradores de inúmeras perdas financeiras e humanas, principalmente em regiões mais vulneráveis. Além disso, ainda existe uma certa carência de informações a respeito dos eventos, algo que dificulta uma abordagem mais precisa e efetiva dos gestores públicos e da comunidade científica, no Brasil.

Diversos autores têm apresentado uma abordagem comparativa entre os métodos computacionais, onde em uma determinada área de estudo são avaliadas as ocorrências de inundação, entretanto, nessas aplicações são utilizados muitas vezes *softwares* mais robustos, que por vezes exigem assinatura e necessitam de uma grande quantidade de dados de entrada. Por outro lado, o programa SWMM tem desempenhado papel importante na avaliação das inundações ocorridas em bacias urbanas.

Porém, ainda há poucos estudos e carência de procedimentos e protocolos que possibilitem uma avaliação mais dinâmica e simplificada dos eventos de inundações urbanas, que quando realizados dariam segurança aos tomadores de decisão usarem essas ferramentas, dados e informações disponíveis para gestão do evento.

Desta forma, a presente análise busca avaliar as inundações urbanas para diferentes cenários de precipitação, por meio de um estudo de caso feito em ambiente computacional, na cidade de Batayporã – MS.

## **METODOLOGIA**

A área de estudo está localizada no município de Batayporã, situado ao sul da região Centro-Oeste do Brasil, a leste de Mato Grosso do Sul, na divisa de Paraná/São Paulo. Localiza-se na latitude de 22°32'45" Sul e longitude de 55°09'00" Oeste, distante 313 km da capital estadual (Campo Grande) e 1.182 km da capital federal (Brasília).

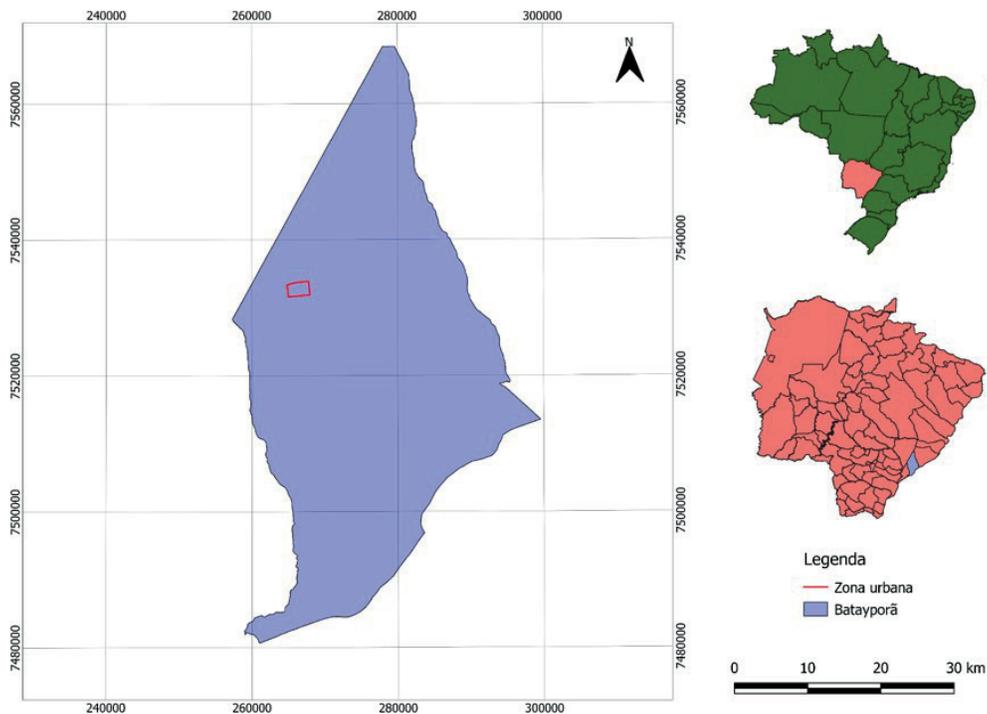


Figura 1 - Mapa de localização de Batayporã/MS

A lagoa é um importante ponto turístico da cidade, se apresentando como um marco administrativo e referência de local de lazer para a população. Por uma ótica hidrológica, a cidade está sob influência da bacia do Rio Pardo, que pertence a macrobacia do Rio Paraná, ladeada pelos córregos Escondido e Ribeirão Esperança.

O estudo de caso é correspondente ao evento ocorrido em 12 de outubro de 2022. Segundo o relatório disponibilizado Defesa Civil, por volta das 15:00 ocorreu uma precipitação que se desenvolveu por aproximadamente 40 minutos totalizando 120mm de precipitação acumulada. Esta altura foi suficiente para desencadear um intenso evento de inundação nas proximidades da Lagoa do Sapo, ocupando boa parte do centro e adentrando residências e comércios, causando grande comoção social e administrativa. A Figura 2 apresenta os registros fotográficos do evento ocorrido.



Figura 2 - Inundação ocorrida em 12 de outubro de 2022

Através do cadastro topográfico fornecido pela Schettini Engenharia Ltda, foi possível observar que a região apresenta relevo majoritariamente plano com leves presenças de suave a ondulado na região norte da cidade, sendo que, devido a perfil topográfico da região é possível observar que a cidade está localizada em uma depressão topográfica direcionado todo escoamento superficial tem como destino a lagoa.

A Lagoa do Sapo, possui uma área de contribuição de 7,77 km<sup>2</sup>, a parcela ao norte da bacia (zona rural) apresenta cobertura de solo do tipo campos dedicados ao pasto e plantações em curvas de nível, já a zona urbana da cidade é marcada principalmente por residências unifamiliares sem presença de edifícios e com a maior parte das vias asfaltadas.

A cidade de Batayporã, está sobre majoritariamente Latossolo Vermelho – Escuro Alúvico, de textura argilosa, com características geológicas da Formação Caiuá, (Ks), sobre rochas arenosas/quartzosas, alteradas para residuais ou coluvionares de areias fina a média, extremamente vulneráveis à erosão advindas de agentes hidrológicos (SEPLAN – MS).

Com relação a precipitação, foi adotado a equação IDF apresentada por Figueiredo e Miyasato (2013), onde o estudo apresenta equações para todas as cidades do estado de Mato Grosso do Sul, baseado nas formulações apresentada por Otto Pfafsteter, sendo que o local de estudo está presente na isozona 32, sob regime da Equação (1).

$$I = \frac{1.331,82 \times T_r^{0,142}}{(tc + 13)^{0,801}} \quad (1)$$

Sendo I a intensidade da chuva precipitada, Tr referente ao tempo de retorno e t é a duração do evento.

Pelo lado hidráulico do sistema de drenagem, a Lagoa do Sapo desempenha o papel de uma bacia de amortecimento, possuindo um extravasor em galeria de concreto com diâmetro de 1,20m, este dispositivo localizado a 1,50m do fundo da bacia, onde a captação é feita por uma tomada d'água, conduzindo o escoamento sobre a Avenida Antonia Spinosa Mustafá até a zona rural, desaguando em um pequeno canal de concreto por aproximadamente 450m até atingir um canal natural que tem seu fim em um pasto, escoando de maneira superficial até o Rio Samambaia.

Para as simulações hidrológicas e hidráulicas foi adotado o *software Storm Water Management Model (SWMM)*, da *United Environmental Protection Agency (EPA)*, o programa trabalha com simulações em 1D, onde a precipitação informada é recebida pela bacia posteriormente conduzida até o nó, estes dispositivos recebem esse deflúvio e o volume é conduzido pelos condutos até o exutório, dentro do modelo o escoamento superficial é calculado pela diferença entre a precipitação, evaporação e infiltração, onde o volume excedente é transformado em escoamento superficial (Rossman, 2015). A Figura 3 apresenta um modelo básico de funcionamento da simulação.

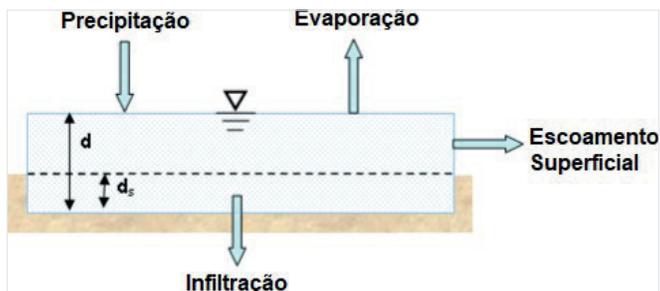


Figura 3 – Funcionamento básico da bacia hidrográfica no SWMM

Deste modo, o estudo propôs 5 cenários de simulação com intensidades distintas, sendo estes apresentados pelo Tabela 1.

Cenário	CN01	CN02	CN03	CN04	CN05
Precipitação (mm)	10	50	100	120	150

Tabela 1 - Cenários propostos

Para construção do modelo digital da bacia hidrográfica foram levantados os seguintes dados descritos na Tabela 2.

Elemento	Dado	Definição
Bacia	Área	Área da bacia
	Largura	Largura média da bacia
	Declividade	Declividade média da bacia em percentagem
	Área Imper.	Porcentagem de área impermeável na bacia
	n Imper.	Número de Manning referente a parcelaimpermeável da bacia
	n Perm.	Número de Manning referente a parcela permeável da bacia
Conduto	Forma	Formato da seção transversal
	Profundidade Máxima	Profundida máxima da seção transversal
	Comprimento	Comprimento do conduto entre os nós a jusante e amontante
	n Manning	Número de Manning atribuído ao conduto
	Offset de Entrada	Cota do contudo em relação ao radier a montante
	Offset de Saída	Cota do contudo em relação ao radier a jusante
Nó	Cota do radier	Cota do radier

Tabela 2 – Dados de entrada no SWMM

O coeficiente de Manning adotado para o estudo foi baseado em valores sugerido por Porto (2006) e adotados por Souza, Crispim e Formiga (2012) e Silva (2019) para estudos similares ao proposto. Os respectivos valores adotados podem ser vistos na Tabela 3.

Coeficiente de Manning			
Imper. Bacias	Perm. Bacias	Conduto Canalizado	Conduto Natural
0,012	0,150	0,014	0,025

Tabela 3 - Coeficiente de Manning utilizado.

## Calibração do modelo

Na ocorrência do evento em estudo, não houve nem um tipo de aferição de cotas nas esquinas tomadas pela água ou qualquer outro tipo de levantamento que corroborasse para a calibração do modelo, por parte das entidades públicas de Batayporã.

Deste modo, se seguiu um processo de calibração mais simplificado, realizado em duas etapas.

O primeiro método considerou que o volume excedente encontrado pela SWMM, representa uma cota de inundação simulada, para determinar este valor foi cálculo o volume entre um plano (cota de inundação) e o MDE, determinado este valor topográfico é possível traçar uma linha de intersecção, encontrando assim a linha de inundação simulada. Esta linha de limite da inundação foi comparada com os registros fotográficos do evento.

Para realizar a calibração nesta etapa, foi adotado se alterar a altura de armazenamento impermeável, uma vez que os demais valores de dados de entrada não abrem espaço para manipulação sem descaracterizar significativamente a área de estudo.

A segunda abordagem considerou o erro de continuidade informado pelo SWMM, Rossman (2015), classifica valores -0,05% e -0,064%, para erro de escoamento e vazão respectivamente, como desprezíveis podendo se entender como valores excelentes ou muito bom. Por outro lado, Silva (2019) considerou que valores aceitáveis estão compreendidos até o limite de 10% de erro, deste modo, o presente estudo se pautou nestes dois intervalos para validar as simulações. O Tabela 4 apresenta os valores máximos de erro adotado.

Classificação	Erro de continuidade		Fonte bibliográfica
	Vazão	Escoamento Superficial	
Muito bom	±0,5%	±0,05%	(Rossman, 2015)
Aceitável	±10%	±10%	(Silva, 2019)

Tabela 4 - Classificação do erro de continuidade.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a bacia hidrográfica caracterizada e determinado os demais dados necessários para realizar a simulação, foi construído o modelo no SWMM. A Tabela 5 apresenta os dados de entrada no modelo e a Figura 4 apresenta a bacia hidrográfica da área de estudo.

Bacia	Área (ha)	L (m)	l (m/m)	%Imp	SCS CN	n-Imp	n-Per
1	95,944	921,6	0,011	72,53%	89,25	0,011	0,025
2	20,844	204,2	0,010	76,90%	89,69	0,011	0,025
3	11,796	107,4	0,009	69,78%	88,98	0,011	0,025
4	9,11	83,9	0,008	82,66%	90,27	0,011	0,025
5	5,96	58,6	0,008	66,28%	88,63	0,011	0,025
6	3,824	73,8	0,007	85,60%	90,56	0,011	0,025
7	8,269	74,2	0,008	52,96%	87,30	0,011	0,025
8	2,168	40,9	0,005	92,17%	91,22	0,011	0,025
9	20,535	173,6	0,007	49,71%	86,97	0,011	0,025
10	1,519	14	0,005	95,00%	91,50	0,011	0,025
11	0,613	41	0,002	91,80%	91,18	0,011	0,025
12	0,623	39,3	0,010	91,94%	91,19	0,011	0,025
13	0,526	36,8	0,011	94,34%	91,43	0,011	0,025
14	0,614	39,6	0,005	80,65%	90,06	0,011	0,025
15	0,599	38,7	0,005	95,00%	91,50	0,011	0,025
16	52,968	365,3	0,005	68,42%	88,84	0,011	0,025
17	1,317	24,9	0,003	89,57%	90,96	0,011	0,025
18	3,917	73	0,003	88,49%	90,85	0,011	0,025
19	3,663	69	0,004	85,79%	90,58	0,011	0,025

20	32,64	200,3	0,005	69,10%	88,91	0,011	0,025
21	30,338	183,3	0,007	69,13%	88,91	0,011	0,025
22	113,548	812,8	0,011	43,76%	86,38	0,011	0,025
23	2,145	37,8	0,005	92,52%	91,25	0,011	0,025
24	24,628	161,3	0,009	71,51%	89,15	0,011	0,025
25	266,357	964,8	0,009	32,38%	85,24	0,011	0,025
26	64,148	502,7	0,012	35,54%	85,55	0,011	0,025

Tabela 5 - Dados de entrada no SWMM

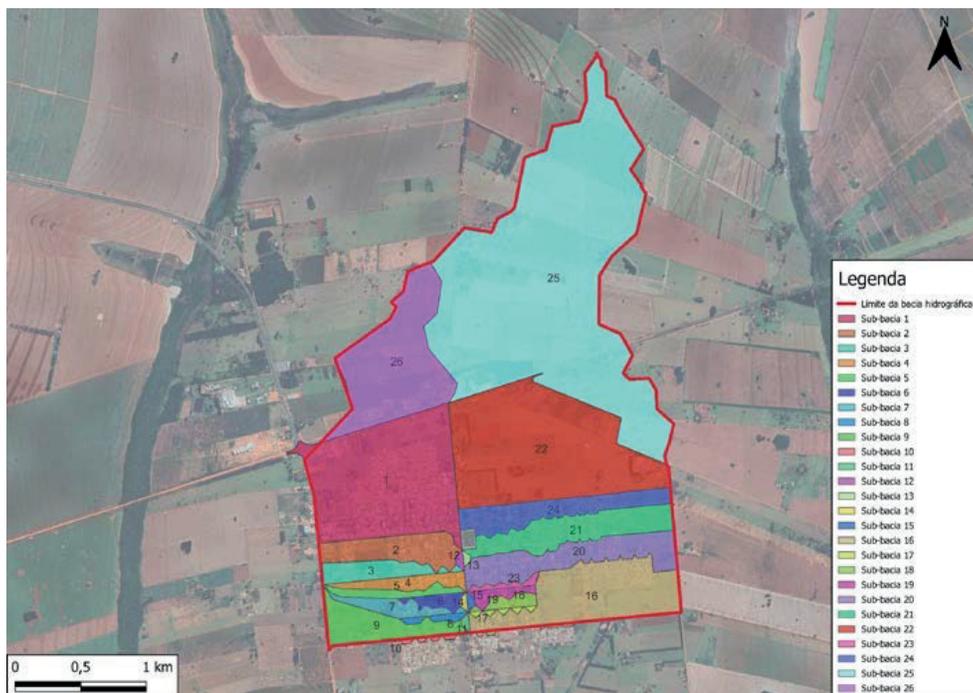


Figura 4 – Bacia hidrográfica da Lago do Sapo

Mediante a metodologia de calibração adotada, após sucessivas rodadas de ajustes no parâmetros de calibração proposto, foi definido que para melhor representar o evento ocorrido, deveria ser atribuído o valor de 0mm para a profundidade de armazenamento de área impermeável, isto se transcreveu na mancha de inundação observada na Figura 5.



Figura 5 - Mancha de inundação para calibração do sistema

Com a calibração realizada, foram feitas as simulações para os demais cenários, sendo que o CN04, apresentou pico de inundação de 64.610,31m<sup>3</sup>, apontando que a lâmina d'água no evento chegou à cota 316,330m. A Figura 6 apresenta o volume e cota obtido para os cenários de simulação.

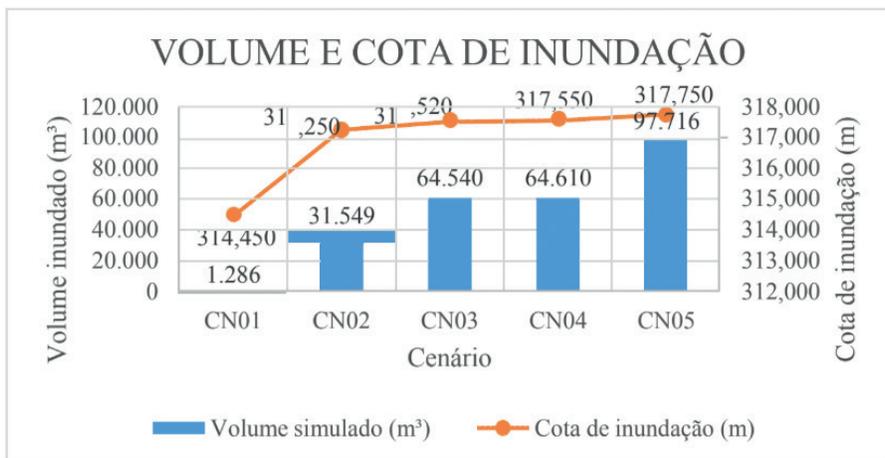


Figura 6 – Relação volume e cota de inundação

Estas cotas representaram as manchas de inundações expostas na Figura 7, onde se observa que a precipitação do CN01 não apresenta capacidade verter sobre a crista da lagoa de maneira significativa, por outro lado eventos superiores, como o de 50mm, apresentam lâmina d'água de inundação suficiente para atingir residências e comércios nas imediações da Lagoa do Sapo.

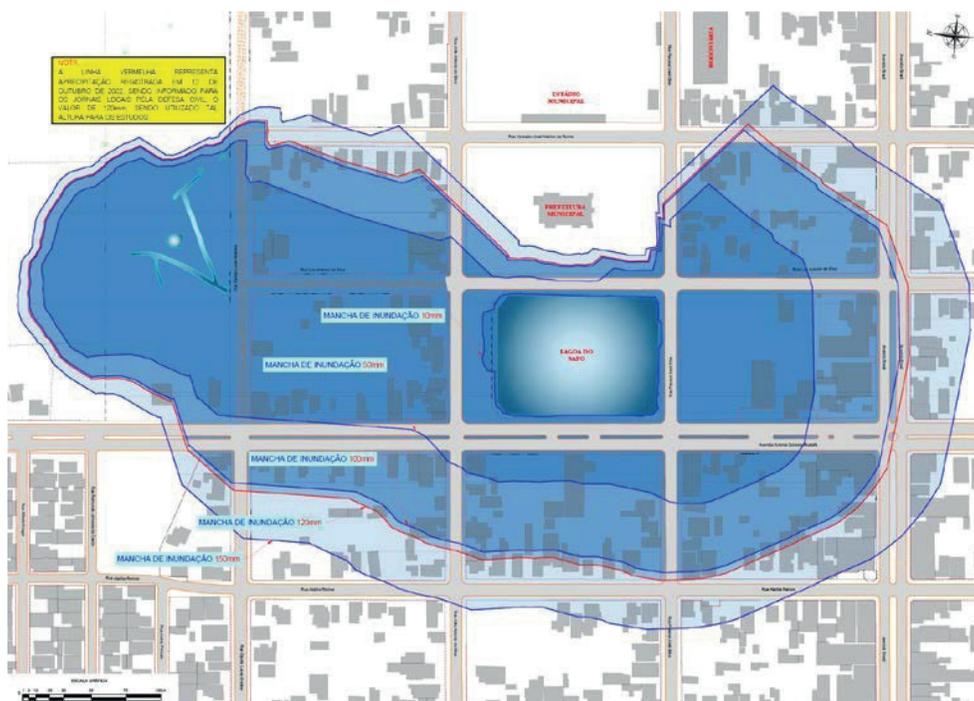


Figura 7 – Mancha de inundação para os cenários proposto

De posse das manchas de inundações, foi contabilizado o número de residências potencialmente afetadas para cada um dos cenários propostos, sendo que, para o evento ocorrido (CN04), estimasse que foram atingidas 97 residências. Até o momento da realização do estudo, não há informações de fontes públicas ou jornalísticas do número exato de pessoas ou residências afetadas na chuva ocorrida em 12 de outubro de 2020. O Tabela 6 apresenta a contabilização das residências afetadas para cada um dos cenários proposto.

Cenário	Área inundada (ha)	Volume inundado (m³)	Residências afetadas
CN01	1,05	5.416,83	0
CN02	8,69	31.548,56	45
CN03	13,75	64.540,10	91
CN04	14,36	64.610,31	97
CN05	18,50	97.716,49	143

Tabela 6 – Áreas e volumes inundados para os cenários propostos.

Dentre as possibilidades de intervenção propostas para solução da problemática está a ampliação do sistema de vertimento da lagoa e a construção de 4 bacia de amortecimento, que visam captar o escoamento superficial gerado pela porção norte da cidade para amortecer o pico de vazão direcionado a lagoa.

O sistema de vertimento proposto é composto por uma tomada d'água no mesmo nível topográfica do vertedouro existente com diâmetro de 1,50m em PEAD, por outro lado, as bacias de amortecimento, com locais definidos junto a Prefeitura Municipal de Batayporã, devem possuir aproximadamente 19.300,00m³ de capacidade de armazenamento total. Sendo apresentado pela Figura 8 a influência destes dispositivos na vazão de transbordamento da Lagoa do Sapo para o cenários mais crítico investigado.



Figura 8 - Vazão de inundação para precipitação de 150mm

Portanto, com a implementação do sistema proposto o pico de vazão de transbordamento da Lagoa do Sapo, que ocorre em uma hora e vinte minutos após o início da precipitação, onde este valor seria atenuado de 2.705,33m³/s para 535,34m³/s.

## CONCLUSÃO

A partir dos resultados do estudo realizado, foi possível concluir que as inundações na Lagoa do Sapo tendem a aumentar seu impacto em decorrência do aumento da precipitação, atingindo diversas residências e comércios na proximidade do local.

Deve-se ressaltar que mediante aos constantes eventos de precipitação que deflagram cenários similares ao ocorrido, se faz necessário o planejamento de intervenções hidráulicas no sistema de drenagem. Onde, a solução proposta apresenta um risco um risco residual de inundação, mas que em comum acordo com a Prefeitura de Batayporã é aceitável devido as questões orçamentárias para solução da problemática.

Estudo futuros de inundações na região devem se debruçar sobre soluções complementares de medidas mitigadores em escala menores como micro armazenamento nos lotes e adoção de *Low Impact Development* (LIDs), que não foram escopo do presente estudo.

## REFERÊNCIAS

BOTELHO, M. H. C. (2017) *Águas de Chuva: Engenharia das águas Pluviais nas Cidades*. 4o ed. Blucher.

CEPED UFSC. Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 a 2012. (2013). *Centro Universitário de Estudos e Pesquisas Sobre Desastres, Universidade Federal de Santa Catalina*, pp. 126.

FIGUEIREDO, R. S.; MIYASATO, R. O. (2013). *Chuvas no Mato Grosso do Sul: Equação de intensidade, duração e frequência*, Universidade de Guarulhos.

GOERL, R. F.; MICHEL, G. P.; KOBAYAMA, M. (2017). *Mapeamento de áreas susceptíveis a inundação com o modelo HAND e análise do seu desempenho em diferentes resoluções espaciais*. Revista Brasileira de Cartografia, v. 69, pp. 61–69.

HIRATA, E. *et al.* (2013). *Mapeamento dinâmico e colaborativo de alagamentos na cidade de São Paulo*. Boletim de Ciencias Geodesicas, v. 19, n. 4, pp. 602–623.

HORA, S. B. DA; GOMES, R. L. (2009). *Mapeamento e avaliação do risco a inundação do Rio Cachoeira em trecho da área urbana do Município de Itabuna/BA*. Sociedade & Natureza, v. 21, n. 2, pp. 57–75.

KOBAYASHI, K. *et al.* (2019). *Catalogue of Hydrologic Analysis for Asia and the Pacific I Volume 1 Flood Hazard Mapping*. v. 1, pp. 106.

PINHEIRO, A.; FRANK, B. (2003). *Enchentes na Bacia do Rio Itajaí: 20 anos de experiências*. Blumenau: Edifurb.

PORTO, R.M. (1998). *Hidráulica Básica*. EESC/USP São Carlos- SP, 273.

SHAKTI, P. C.; KAMIMERA, H.; MISUMI, R. (2020). *Inundation analysis of the oda river Basin in Japan during the flood event of 6-7 july 2018 utilizing local and global hydrographic data*. Water (Switzerland), v. 12, n. 4.

SILVA, J. F. F. (2019). *Alternativas para controle de alagamentos urbanos utilizando telhados verdes e pavimentos permeáveis em um bairro da cidade do Recife*. [s.l.] Universidade Federal de Pernambuco.

SOUZA, R. M.; CRISPIM, D. C.; FORMIGA, K. (2012). *Estudo comparativo entre os modelos SWMM e HEC-HMS para simulação de escoamento superficial – caso de estudo bacia do Córrego Samambaia*. REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil, v. 5, n. 2, pp. 1–11.

TUCCI, C. E. M. *et al.* (2014). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 4o ed ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH.

UNESCO; UN-WATER. (2020). *United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change*. Paris.

UNDRR. (2019). *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*. Geneva, Switzerland.

# INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DE TERMOSSIFÕES CONTENDO NANOFUIDO DE ÓXIDO DE GRAFENO APLICADOS NO RESFRIAMENTO DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS

*Data de aceite: 01/07/2024*

### **Humberto Ianczkovski**

Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica - Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR/  
Ponta Grossa)

### **Allefe Jardel Chagas Vaz**

Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica - Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR/  
Ponta Grossa)

### **Victor Vaurek Dimbarre**

Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica - Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR/  
Ponta Grossa)

### **Rozane de Fátima Turchiello Gómez**

Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica - Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR/  
Ponta Grossa)

### **Thiago Antonini Alves**

Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica - Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR/  
Ponta Grossa)

**RESUMO:** Termossifões são dispositivos passivos capazes de transferir grandes quantidades de calor, por meio do calor latente de vaporização de um fluido de trabalho. Os nanofluidos apresentam-se como uma nova geração de meios de transferência de calor, em função do aprimoramento de propriedades termofísicas. Em razão dessas circunstâncias, no presente trabalho, foi executada uma investigação experimental do desempenho térmico de termossifões utilizando nanofluido de óxido de grafeno, em concentrações volumétricas de 5,0% e 2,5%, como fluido de trabalho. Quanto às características geométricas dos invólucros, os mesmos foram construídos em cobre, com diâmetro externo de 9,45mm, diâmetro interno de 7,75mm e comprimento total de 200mm. Os testes experimentais foram realizados em duas inclinações diferentes (45° e 90° em relação à horizontal) sob cargas térmicas de 5W a 45 W e com convecção forçada no condensador. Os resultados demonstraram que a utilização do nanofluidos óxido de grafeno reduziu consideravelmente a resistência térmica e a temperatura de operação do termossifão, em comparação à utilização de água destilada como fluido de trabalho, além disso, a concentração volumétrica de 2,5% apresentou os resultados otimizados entre os fluidos de trabalho analisados.

**PALAVRAS-CHAVE:** termosifão, nanofluido, óxido de grafeno, experimental.

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THERMOSYPHONS CONTAINING GRAPHENE OXIDE NANOFUID APPLIED IN THE COOLING OF ELECTRONIC EQUIPMENT

**ABSTRACT:** Thermosyphons are passive devices able to transfer large amounts of heat through the latent heat of vaporization of a working fluid. Nanofluids are presented as a new generation of heat transfer fluids due to the improvement of thermophysical properties. Given these circumstances, in the present article, an experimental analysis of the thermal performance of thermosyphons was performed using graphene oxide nanofluid, in volumetric concentrations of 5.0% and 2.5%, as working fluid. For the geometric characteristics of the enclosures, they were built in copper, with an outer diameter of 9.45mm, an inner diameter of 7.75mm, and a total length of 200mm. The experimental tests were done at two different inclinations (45 and 90° in relation to the horizontal), under thermal loads from 5 to 45W and with forced convection in the condenser. The results showed that the use of graphene oxide nanofluid reduced considerably the thermal resistance and the operating temperature of the thermosyphon, when compared to the use of distilled water as a working fluid, furthermore, the volumetric concentration of 2.5% presented the optimized results among the analyzed working fluids.

**KEYWORDS:** thermosyphon, nanofluid, graphene oxide, experimental.

### INTRODUÇÃO

Um dos desafios para os projetos tecnológicos de diversos dispositivos, especialmente a partir do início do século XXI, é a redução de sua massa, buscando diminuir seu consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub>. Dessa forma, faz-se necessária a substituição de metais por materiais sintéticos mais leves, os quais apresentam-se como maus condutores de calor. Portanto, são requeridas novas e mais eficientes abordagens de arrefecimento, para as quais os termosifões mostram-se de forma promissora e cada vez mais aplicados (Nikolayev, 2021).

Os termosifões são dispositivos passivos capazes de transferir quantidades notáveis de calor através do calor latente de um fluido de trabalho (Maldonado *et al.*, 2020). Tais sistemas apresentam uma alta condutividade térmica, com temperatura praticamente constante, podendo ser várias ordens de magnitude maior do que a condução pura através de um metal sólido, fato qual confere aos termosifões a designação de supercondutores (Ramos *et al.*, 2016).

O fornecimento de energia na forma de calor nesses dispositivos acontece na região do evaporador, realizando a evaporação do fluido de trabalho; esse vapor flui ao longo da seção adiabática, a qual encontra-se isolada do meio, em direção ao condensador, onde ocorre a rejeição do calor e a condensação do fluido de trabalho, conforme representado na Figura 1. O retorno do fluido de trabalho para o evaporador, fato que completa o ciclo termodinâmico, ocorre por ação da força gravitacional nos termosifões (Reay *et al.*, 2018).

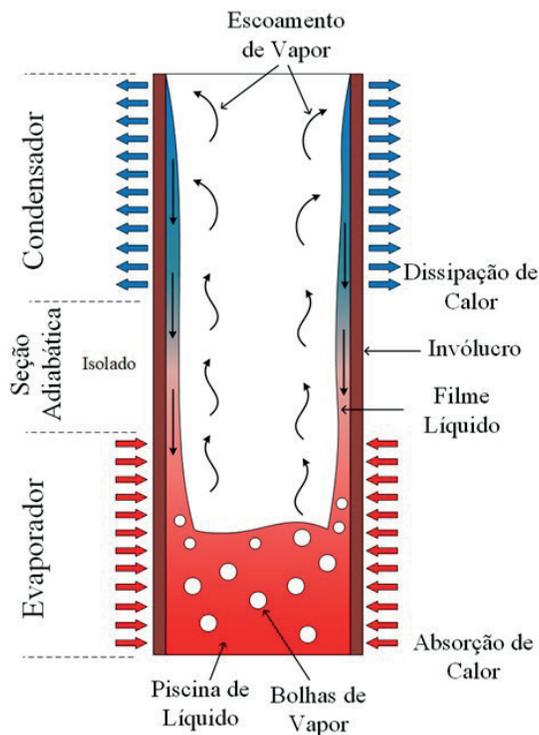


FIGURA 1. Diagrama esquemático do funcionamento de um termosifão.

Fonte: Machado (2022).

Outro ponto essencial na busca pela melhoria de sistemas térmicos é o aumento da capacidade de transferência de calor dos fluidos de trabalho. Avanços na nanotecnologia tornaram possível o desenvolvimento de nanofluidos, que são produzidos pela dispersão de nanopartículas em um fluido base, os quais possibilitam grandes desenvolvimentos em diferentes setores industriais em termos de meio ambiente, energia e economia (Ghorabae *et al.*, 2021).

Durante os últimos anos, diversas pesquisas avaliaram a viabilidade do uso de nanofluidos em termosifões. Os resultados demonstraram uma diminuição da resistência térmica do dispositivo e um aumento da quantidade de energia transferida, resultando em um aprimoramento da eficiência geral do sistema em comparação com a configuração operando com água destilada como fluido de trabalho (Jouhara *et al.*, 2017).

## JUSTIFICATIVA

De acordo com Ghorabae *et al.* (2021), diversas variáveis afetam o desempenho de termossifões, tais como: carga térmica, material do tubo, dimensões, razão de preenchimento, ângulo de inclinação e fluido de trabalho; o qual, devido às propriedades termofísicas correspondentes, é o parâmetro dominante na eficiência do dispositivo. Desse modo, o presente estudo demonstra, de forma experimental, uma avaliação dos seguintes parâmetros operacionais: carga térmica, ângulo de inclinação e fluido de trabalho, visando uma melhoria na eficiência térmica do sistema, que representa uma economia de custos para indústrias e maior preservação do meio ambiente para a humanidade.

## OBJETIVO

Neste contexto, o presente artigo tem por objetivo geral analisar, de forma experimental, o desempenho térmico de termossifões, que podem ser aplicados ao resfriamento de sistemas eletroeletrônicos, utilizando nanofluido de óxido de grafeno, com concentrações volumétricas de 5,0% e 2,5%, e água destilada, como fluidos de trabalho, além de variar parâmetros operacionais como carga térmica e inclinação de trabalho.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são apresentados em detalhes as características dos termossifões, o processo de síntese do nanofluido de óxido de grafeno e a metodologia e procedimentos experimentais utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

### Descrição do Problema

Para a presente investigação experimental foram construídos termossifões em configurações de acordo com Antonini Alves *et al.* (2018). Para o dispositivo passivo de transferência de calor (termossifão) foi comparada a utilização de água destilada como fluido de trabalho em relação ao nanofluido de óxido de grafeno com diferentes concentrações volumétricas considerando cargas térmicas crescentes e duas diferentes inclinações de operação.

### Construção dos Termossifões

A construção dos termossifões foi realizada no Laboratório de Controle Térmico (LabCT) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *Campus* Ponta Grossa.

A metodologia utilizada no processo de construção desses dispositivos (limpeza, montagem, teste de estanqueidade, procedimento de evacuação e preenchimento com fluido de trabalho), na montagem do aparato experimental e no procedimento experimental foi baseada em Antonini Alves *et al.* (2018).

## Características dos Termossifões e do Nanofluido de Óxido de Grafeno

Os dispositivos foram constituídos por um invólucro de cobre ASTM B75, com 200mm de comprimento, diâmetros interno e externo iguais a 7,75mm e 9,45mm, respectivamente. As tampas de fechamento foram usinadas a partir de uma barra maciça de cobre, com diâmetro de 9,45mm, e uma delas apresenta um furo passante para a inserção do capilar, de diâmetro externo igual a 1,62mm (0,064") e comprimento de 40mm. A Figura 2 demonstra os componentes básicos dos termossifões.

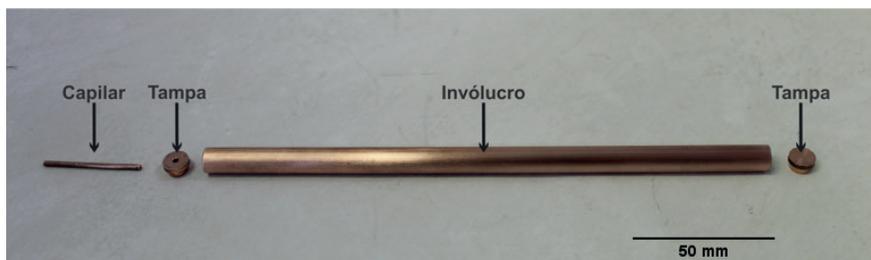


FIGURA 2: Componentes básicos dos termossifões.

Fonte: Autoria própria (2022).

Os termossifões apresentam um evaporador de 80mm de comprimento, uma seção adiabática de 20mm e um condensador de 100mm de comprimento. De acordo com Aguiar (2016), a razão de preenchimento ideal para o termossifão com essa configuração é de 40% do volume total do evaporador. Os fluidos de trabalho utilizados foram água destilada e nanofluidos de óxido de grafeno com concentrações volumétricas de 5,0% (denominado GO 5,0%) e de 2,5% (denominado GO 2,5%).

O nanofluido de óxido de grafeno foi sintetizado através do Método de *Hummers* (Hummers e Offeman, 1958), a partir de grafite em pó, com modificação na reação, retirando o nitrato de sódio ( $\text{NaNO}_3$ ), chamada Síntese *Eco-friendly* ou Método de *Hummers* Modificado. A sintetização do óxido de grafeno foi executada no Laboratório de Sistemas Nanoestruturados (LabSisNano) do Departamento Acadêmico de Física (DAFIS) da UTFPR/Ponta Grossa. Maiores informação sobre a síntese e caracterização do nanofluido de óxido de grafeno utilizado nesse trabalho podem ser encontradas em Ianczkovski (2022).

## Aparato Experimental

O aparato experimental utilizado para o presente estudo foi composto por um sistema de aquisição de dados *Keysight™* DAQ970A com um multiplexador de 20 canais *Keysight™* DAQM901A, uma fonte automática de potência *Keysight™* E36232A, um microcomputador, um *nobreak APC™*, um suporte com garra universal, um ventilador axial *Ultra™* e um anemômetro portátil *Itan™* 720, conforme ilustrado na Figura 3.

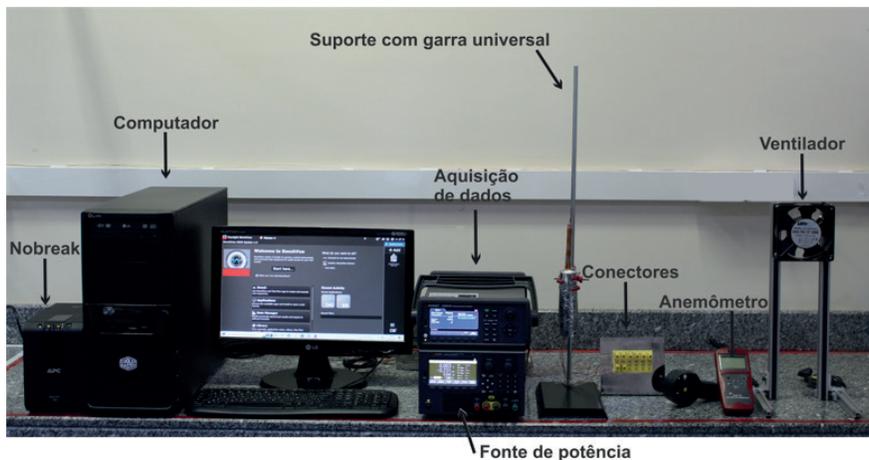


FIGURA 3: Aparato experimental.

Fonte: Autoria própria (2022).

Para obtenção das temperaturas ao longo do comprimento dos dispositivos, foram utilizados 8 termopares *Omega Engineering™* do Tipo K (cromel-alumel), sendo 3 no evaporador, 1 na seção adiabática e 4 no condensador. Os termopares foram fixados na parede externa dos invólucros dos termossifões com auxílio de uma fita adesiva termosensível *Kapton™*.

A dissipação de potência no evaporador ocorreu através da passagem de uma corrente elétrica em um resistor elétrico, composto por uma fita resistiva de liga níquel-cromo (80/20) *Omega Engineering™*, gerando um aquecimento por Efeito *Joule* na região. Esse resistor elétrico foi enrolado no evaporador e sua fixação foi realizada através de fita adesiva termosensível *Kapton™*, as pontas da fita resistiva do sistema de aquecimento foram conectadas através de conectores elétricos do tipo garra-jacaré com a fonte automática de potência.

Para garantir que o calor gerado por Efeito *Joule* fosse transferido para o evaporador, e, evitando perdas de calor para o ambiente da seção adiabática, foi necessário a utilização de um isolamento, composto por fibra de vidro, isolamento aeronáutico e tubo esponjoso blindado.

## Procedimento Experimental

Para que os testes experimentais pudessem ser comparados foi necessário o controle da temperatura ambiente do Laboratório de Controle Térmico (LabCT) realizado através de um sistema de ar condicionado *Rhemm™* em  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Os termossifões foram fixados, através da seção adiabática, ao suporte universal com garra, e, subsequentemente, foram ajustados em inclinações de  $90^{\circ}$  ou  $45^{\circ}$ , em relação a horizontal, sempre com o

evaporador abaixo do condensador, como apresentado na Figura 4. Para a convecção forçada no condensador, o ventilador foi fixado de forma que o escoamento de ar incidente sobre a parede externa dos dispositivos passivos estivesse em aproximadamente 5,0m/s, controlado através do anemômetro portátil, com erro experimental de  $\pm 0,2\text{m/s}$ .

Os testes experimentais foram repetidos três vezes, para cada fluido de trabalho e inclinação analisados. A carga térmica aplicada ao evaporador variou entre 5W até 45W, com intervalos crescentes de 5W; cada potência foi mantida por 15 minutos, onde foi possível verificar a condição de funcionamento em regime *quasi* permanente. Devido a questões de segurança, a temperatura máxima do evaporador durante os testes experimentais foi de 150°C. A aquisição de dados foi realizada a cada 10 segundos, através do sistema de aquisição de dados e do software *Keysight BenchVue™*, e, posteriormente os dados foram tratados nos softwares *Microsoft Excel™* e *OriginLab™*.

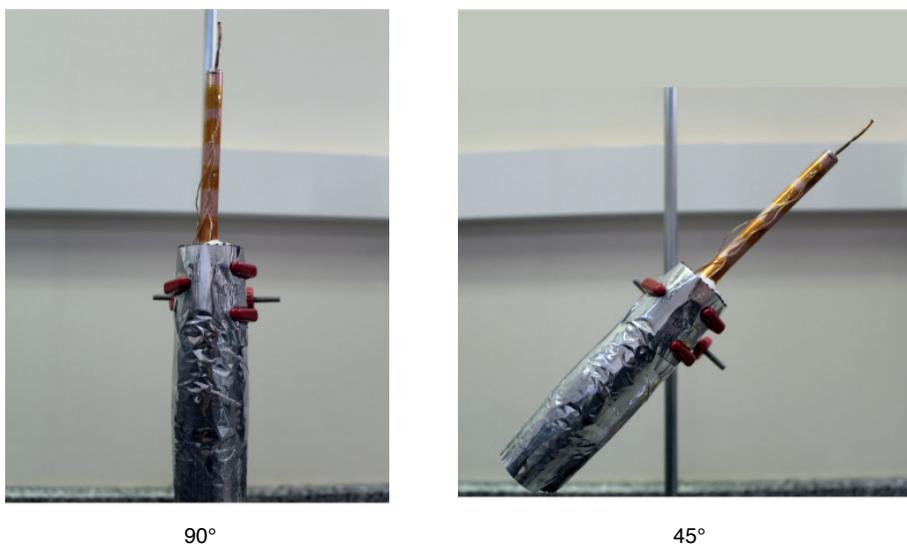


FIGURA 4: Inclinações dos testes experimentais.

Fonte: Autoria própria (2022).

## Procedimento de Cálculo

A resistência térmica global de um termossifão,  $R_{th}$ , é definida por Reay *et al.* (2018) como a razão entre a diferença de temperaturas do evaporador e do condensador e a taxa de transferência de calor total (carga térmica) e pode ser expressa por:

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{q} = \frac{T_{evap} - T_{cond}}{q}, \quad (1)$$

sendo que,  $T_{evap}$  é a temperatura média do evaporador [°C],  $T_{cond}$  é a temperatura média do condensador [°C] e  $q$  é a potência aplicada no evaporador [W].

Para a análise das incertezas experimentais foi utilizado o método descrito por Holman (2011) e as propagações de incertezas das diferentes magnitudes relacionadas ao estudo experimental foram analisadas através do software *Engineering Equation Solver™* (*EES™*).

## RESULTADOS

Na presente seção são apresentados e discutidos os resultados dos dispositivos passivos de transferência de calor com os diferentes fluidos de trabalho, sob diferentes condições de carga térmica e inclinação de operação.

### Termossifão com Água Destilada

A distribuição de temperaturas em relação ao tempo, para os testes experimentais do termossifão contendo água destilada na inclinação de 90° (posição vertical) é apresentada na Figura 5. É possível verificar os diferentes valores de temperatura assumidos pelas diferentes regiões do termossifão em função da potência dissipada, onde o evaporador apresenta os valores de temperaturas mais elevados, a seção adiabática com valor de temperatura intermediário, e, o condensador, devido a ação de convecção forçada, com os menores valores de temperaturas. O dispositivo passivo de transferência de calor alcançou o regime *quasi* permanente em torno de 700 segundos, após a aplicação da primeira carga térmica no evaporador.

A Figura 6 mostra a distribuição de temperaturas em função do comprimento do termossifão contendo água como fluido de trabalho operando na posição vertical, a partir do qual pode ser observado um comportamento isotérmico no evaporador. Como esperado, devido às condições de convecção forçada, na região do condensador, os quatro termopares apresentaram um gradiente de temperatura ao longo de seu comprimento.

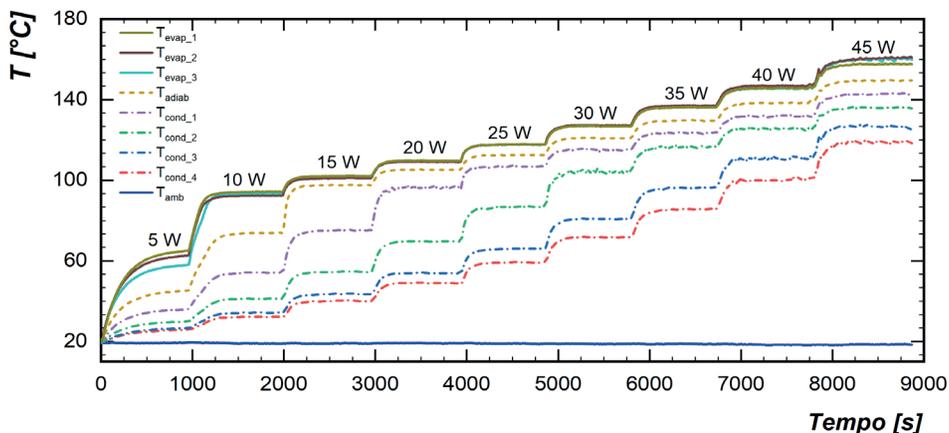


FIGURA 5: Distribuição da temperatura em função do tempo, termostifão com água a 90°.

Fonte: Autoria própria (2022).

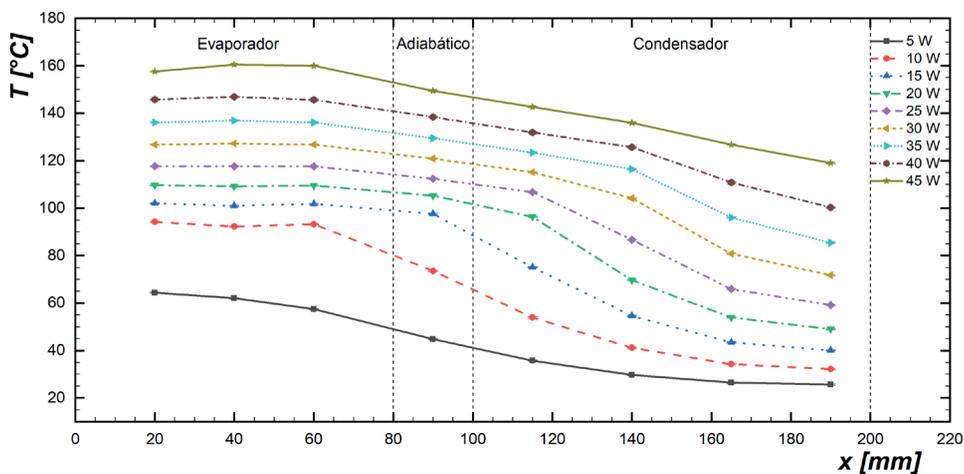


FIGURA 6: Distribuição da temperatura em função do comprimento, termostifão com água a 90°.

Fonte: Autoria própria (2022).

O comparativo experimental do desempenho térmico do termostifão com água destilada, em função da inclinação de trabalho, 90° ou 45°, em relação a horizontal, é apresentado nas Figuras 7 e 8, que correspondem, respectivamente, as temperaturas de operação (temperatura da seção adiabática) e as resistências térmicas dos dispositivos.

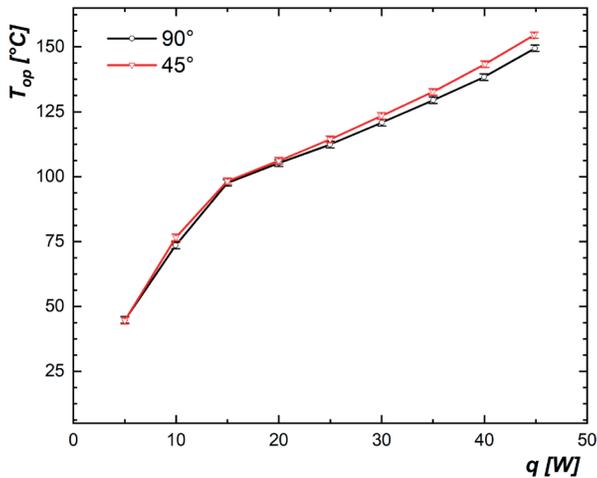


FIGURA 7: Temperatura de operação do termosifão com água.

Fonte: Autoria própria (2022).

Na Figura 7, durante o intervalo de cargas térmicas de 5W a 30W, os valores de temperatura de operação, que é correspondente a temperatura da seção adiabática, são praticamente iguais para ambas as inclinações de trabalho, pois estão dentro da faixa de incerteza experimental. Para cargas térmicas superiores a 30W, a temperatura de operação para inclinação de trabalho de 45° apresenta valores relativamente mais altos em comparação com a inclinação vertical. Em todos os casos, a temperatura de operação aumenta com o aumento da dissipação de potência no evaporador do termosifão.

Pode ser notado na Figura 8 que, para ambas as inclinações de operação, o dispositivo passivo contendo água destilada como fluido de trabalho apresentou valores de resistência térmica equivalentes, em todas as cargas térmicas. A resistência térmica diminui com o aumento da carga térmica dissipada no evaporador. Portanto, de acordo com a literatura, é possível afirmar, juntamente aos dados de temperatura de operação, que o desempenho térmico do termosifão com água destilada para as inclinações em estudo foi apropriado.

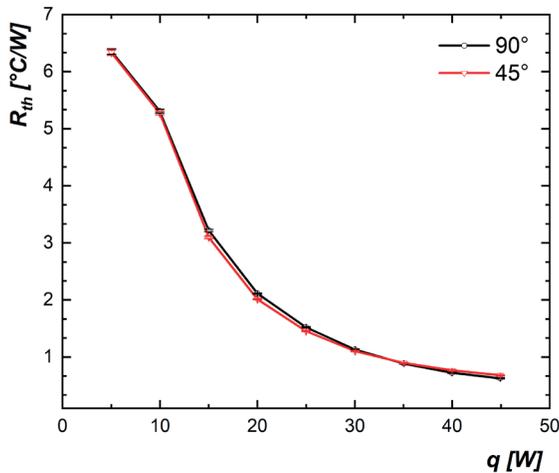


FIGURA 8: Resistência térmica do termossifão com água.

Fonte: Autoria própria (2022).

### Termossifão com Nanofluido de Óxido de Grafeno 5,0%

Com base nos testes experimentais do termossifão com nanofluido de óxido de grafeno de concentração volumétrica igual a 5,0%, como fluido de trabalho, foram obtidas as distribuições de temperaturas em função do tempo e do comprimento, apresentadas nas Figuras 9 e 10, respectivamente, para a inclinação de 90° em relação a horizontal. Durante esses experimentos, o tempo de regime *quasi* permanente foi de 700s para a primeira carga térmica aplicada.

É possível observar que, para o nanofluido de óxido de grafeno com concentração volumétrica de 5,0% (GO 5,0%), o desempenho térmico do termossifão foi coerente, onde o evaporador apresenta as maiores temperaturas, a seção adiabática com temperatura intermediária e o condensador com as menores temperaturas, em cada uma das cargas térmicas aplicadas.

Para o evaporador foi observado uma condição isotérmica, semelhante ao uso de água destilada como fluido de trabalho. Porém, no condensador do termossifão contendo GO 5,0% foi observado um gradiente entre suas temperaturas.

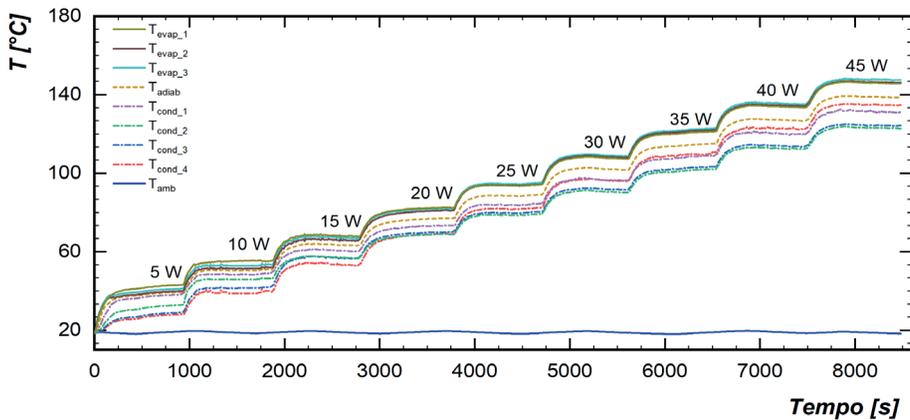


FIGURA 9: Distribuição da temperatura em função do tempo, termostifão com GO 5,0% a 90°.

Fonte: Autoria própria (2022).

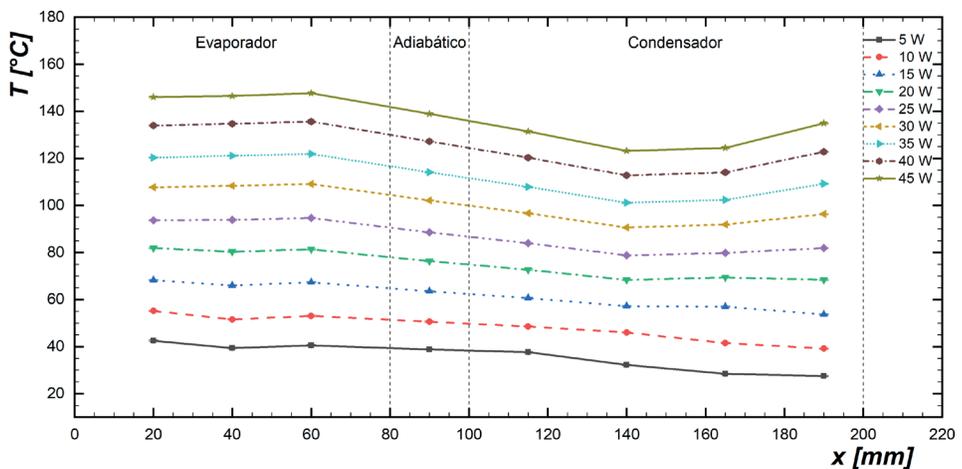


FIGURA 10: Distribuição da temperatura em função do comprimento, termostifão GO 5,0% a 90°.

Fonte: Autoria própria (2022).

Nas Figuras 11 e 12 são apresentadas, respectivamente, as temperaturas de operação e as resistências térmicas em função das inclinações de trabalho considerando o termostifão contendo nanofluido de trabalho com concentração volumétrica de 5,0% (GO 5,0%).

De acordo com a Figura 11, na faixa de aplicação de carga térmica entre 5W e 35W, os valores de temperatura de operação, são praticamente iguais para ambas as inclinações de trabalho. Para cargas térmicas superiores a 35W, a temperatura de operação para 45° apresenta valores ligeiramente superiores. Em ambos os casos, a temperatura de operação aumenta com o aumento da carga térmica aplicada.

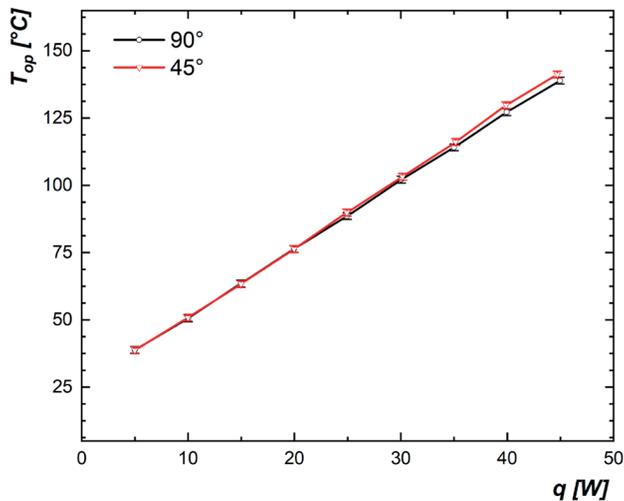


FIGURA 11: Temperatura de operação do termossifão com GO 5,0%.

Fonte: Autoria própria (2022).

A partir das curvas de resistência térmica, Figura 12, pode ser verificado que, para a inclinação de trabalho de 45°, o dispositivo apresentou valores menores de resistência térmica, porém, os resultados são muito similares à posição vertical. A resistência térmica diminui com o aumento da carga térmica aplicada. Dessa forma, é possível afirmar, juntamente aos dados de temperatura de operação, que o desempenho térmico do termossifão para as inclinações em estudo foi aceitável.

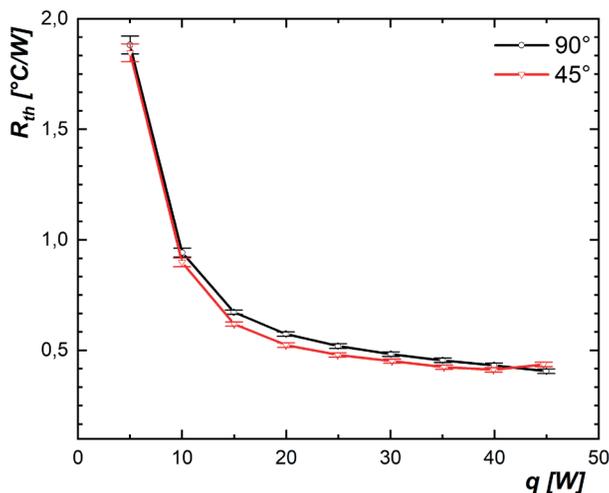


FIGURA 12: Resistência térmica do termossifão com GO 5,0%.

Fonte: Autoria própria (2022).

## Termossifão com Nanofluido de Óxido de Grafeno 2,5%

Após os testes experimentais do termossifão contendo nanofluido de óxido de grafeno de concentração volumétrica igual a 2,5% (GO 2,5%) como fluido de trabalho foram obtidas as distribuições de temperaturas em função do tempo e do comprimento, apresentadas nas Figuras 13 e 14, respectivamente, para a inclinação de  $90^\circ$  em relação a horizontal. Para essa configuração, o tempo de regime *quasi* permanente foi de 700s.

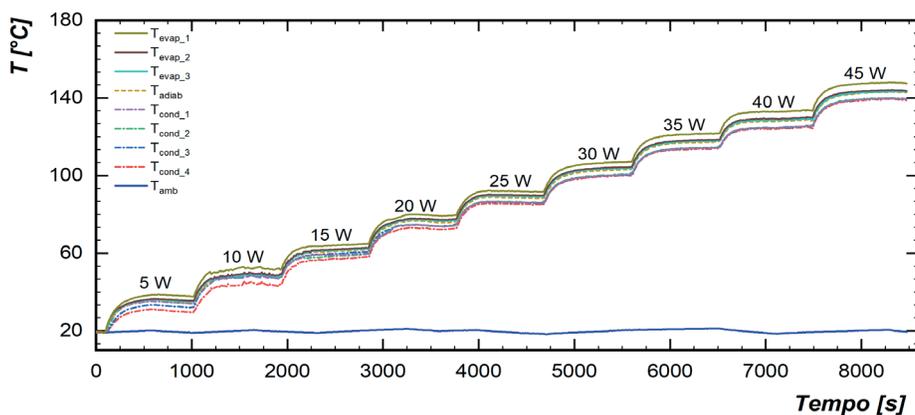


FIGURA 13: Distribuição da temperatura em função do tempo, termossifão com GO 2,5% a  $90^\circ$ .

Fonte: Autoria própria (2022).

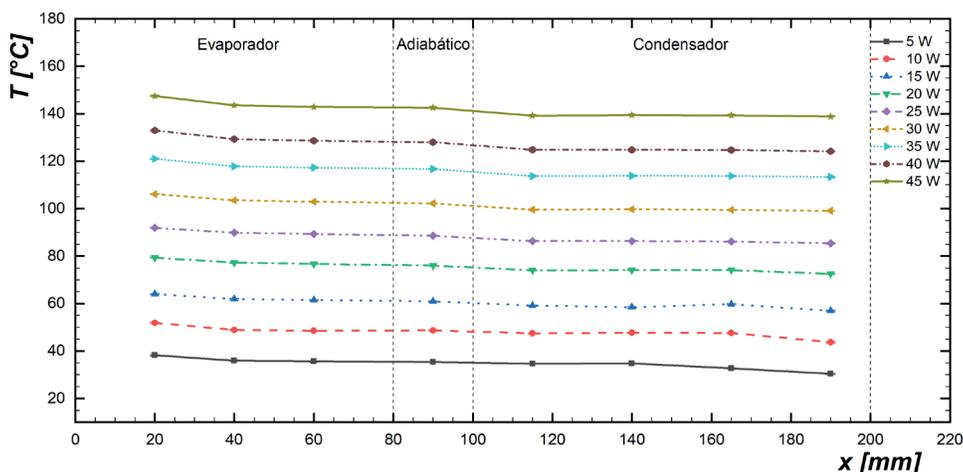


FIGURA 14: Distribuição da temperatura em função do comprimento, termossifão GO 2,5% a  $90^\circ$ .

Fonte: Autoria própria (2022).

Pode ser observado, para o nanofluido de óxido de grafeno com concentração volumétrica de 2,5%, que o desempenho térmico do termossifão ocorreu conforme esperado, onde o evaporador apresentou as maiores temperaturas, a seção adiabática com temperatura intermediária e o condensador apresentando as menores temperaturas, em cada uma das cargas térmicas aplicadas. Pode ser notado ainda, através da Figura 14, que o evaporador e o condensador apresentaram uma condição de isotérmica em suas respectivas regiões.

A Figura 15 apresenta o comportamento da temperatura de operação do termossifão com GO 2,5% em função da carga térmica aplicada considerando ambas as inclinações de trabalho analisadas. Quanto maior a potência dissipada no evaporador maior era a temperatura de operação do termossifão.

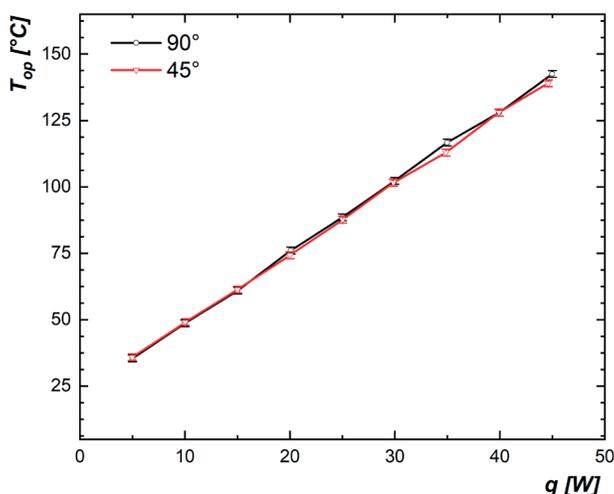


FIGURA 15: Temperatura de operação do termossifão com GO 2,5%.

Fonte: Autoria própria (2022).

De acordo com a Figura 15, no intervalo de carga térmica entre 5W e 30W, os valores de temperatura de operação, que é correspondente a temperatura da seção adiabática, são iguais para ambas as inclinações de trabalho, pois estão dentro da incerteza experimental. Após a carga térmica de 30W, com exceção da carga térmica de 35W, a temperatura de operação do termossifão para a posição vertical (inclinação de 90°) apresentou valores ligeiramente superiores aos resultados com inclinação de 45° em relação a horizontal.

A Figura 16 apresenta o comportamento da resistência térmica do termossifão contendo nanofluido de óxido de grafeno 2,5% em função da carga térmica parametrizado na inclinação de trabalho. Quanto maior a carga térmica no evaporador menor era a resistência térmica do termossifão com GO 2,5%.

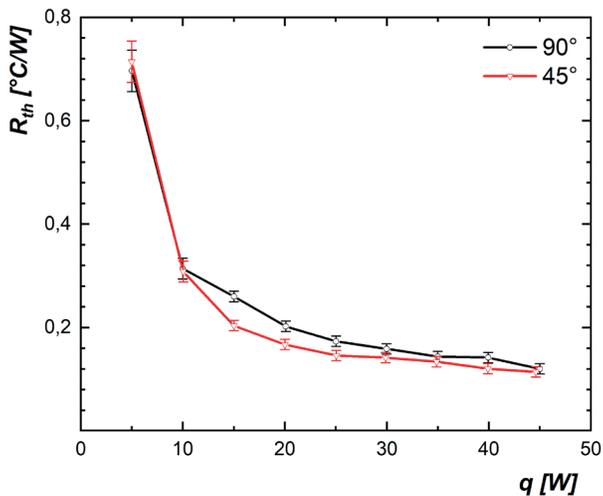


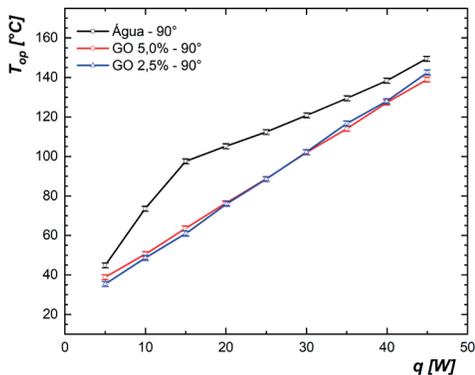
FIGURA 16: Resistência térmica do termostifão com GO 2,5%.

Fonte: Autoria própria (2022).

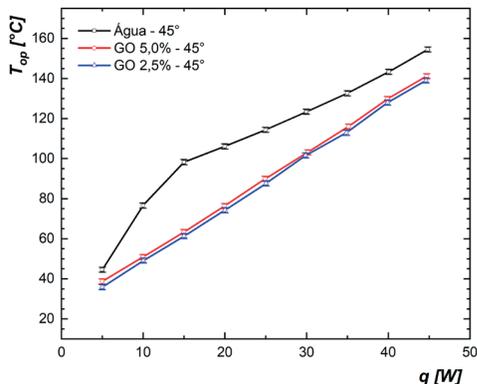
Pode ser verificado que, de uma maneira geral, para a inclinação de trabalho de 45°, o termostifão com nanofluido GO 2,5% apresentou valores menores de resistência térmica em relação aos resultados da posição vertical. Dessa forma, é possível afirmar, juntamente aos dados de temperatura de operação, que o desempenho térmico do termostifão para as inclinações de operação em estudo foi satisfatório.

### Comparação entre os Fluidos de Trabalho no Termostifão

A Figura 17 apresenta um comparativo da temperatura de operação dos termostifões em função da carga térmica aplicada considerando os três diferentes fluidos de trabalho utilizados e as inclinações estudadas.



(a) 90°



(b) 45°

FIGURA 17: Temperatura de operação do termossifão para os diferentes fluidos de trabalho.

Fonte: Autoria própria (2022).

Para as duas inclinações de operação analisadas, e, em toda a faixa de aplicação da carga térmica, as temperaturas de operação dos termossifões contendo nanofluidos de óxido de grafeno exibem valores semelhantes, dentro da incerteza experimental, e inferiores aos valores para o termossifão contendo água destilada como fluido de trabalho. O ponto representativo de carga térmica de 15W apresenta as maiores diferenças relativas da temperatura de operação entre os fluidos: para o nanofluido de óxido de grafeno GO 5,0%, em comparação com a água, houve uma diminuição de 35% para a posição vertical e de 36% para a posição inclinada; enquanto que, para o nanofluido de óxido de grafeno GO 2,5%, em comparação com a água, houve uma diminuição de 38% para ambas as inclinações de operação.

A Figura 18 e a Tabela 1 apresentam o comparativo da resistência térmica dos termossifões em função da carga térmica aplicada considerando os três diferentes fluidos de trabalho utilizados, e considerando ambas as inclinações de operação analisadas.

Carga Térmica [W]	Inclinação de 90°			Inclinação de 45°		
	Água	GO 5,0%	GO 2,5%	Água	GO 5,0%	GO 2,5%
5	6,36 ± 0,05	1,88 ± 0,04	0,70 ± 0,04	6,33 ± 0,05	1,85 ± 0,04	0,71 ± 0,04
10	5,31 ± 0,03	0,94 ± 0,02	0,31 ± 0,02	5,28 ± 0,03	0,90 ± 0,02	0,31 ± 0,02
15	3,22 ± 0,02	0,67 ± 0,01	0,26 ± 0,01	3,10 ± 0,02	0,62 ± 0,01	0,20 ± 0,01
20	2,11 ± 0,01	0,57 ± 0,01	0,20 ± 0,01	2,02 ± 0,01	0,52 ± 0,01	0,17 ± 0,01
25	1,52 ± 0,01	0,52 ± 0,01	0,17 ± 0,01	1,46 ± 0,01	0,48 ± 0,01	0,15 ± 0,01
30	1,13 ± 0,01	0,48 ± 0,01	0,16 ± 0,01	1,11 ± 0,01	0,45 ± 0,01	0,14 ± 0,01
35	0,89 ± 0,01	0,46 ± 0,01	0,14 ± 0,01	0,90 ± 0,01	0,42 ± 0,01	0,13 ± 0,01
40	0,72 ± 0,01	0,43 ± 0,01	0,14 ± 0,01	0,77 ± 0,01	0,41 ± 0,01	0,12 ± 0,01
45	0,63 ± 0,01	0,41 ± 0,01	0,12 ± 0,01	0,68 ± 0,01	0,44 ± 0,01	0,11 ± 0,01

TABELA 1: Resistência térmica[°C/W] para diferentes potências, fluidos de trabalho e inclinações.

Fonte: Autoria própria (2022).

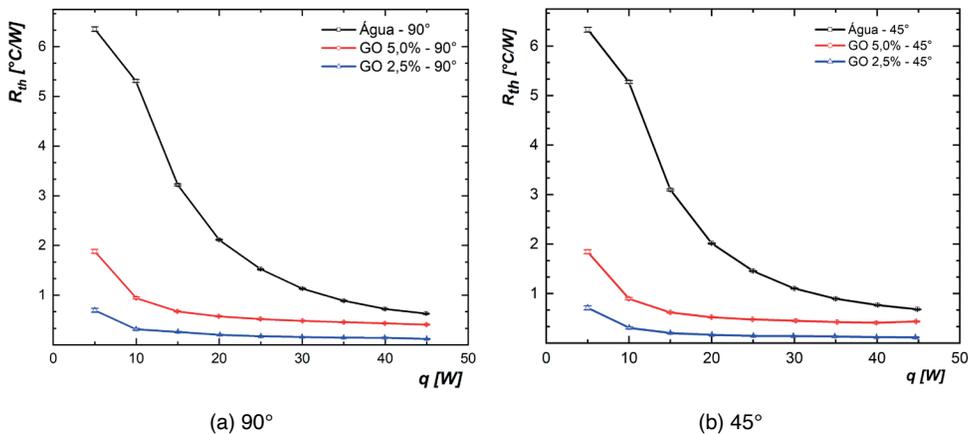


FIGURA 18: Resistência térmica do termossifão para diferentes fluidos de trabalho.

Fonte: Autoria própria (2022).

Esses resultados demonstram uma grande redução da resistência térmica do termossifão, para toda a faixa de aplicação da carga térmica, a partir da utilização do nanofluido de óxido de grafeno. Além disso, o termossifão contendo nanofluido de óxido de grafeno com concentração volumétrica de 2,5% (GO 2,5%) apresentou um desempenho térmico elevado em relação ao termossifão com nanofluido de óxido de grafeno com concentração volumétrica de 5,0% (GO 5,0%).

O termossifão com nanofluido de óxido de grafeno com concentração volumétrica de 5,0% apresentou, em comparação a água destilada, uma redução máxima na resistência térmica de 82% para inclinação de trabalho de 90° (posição vertical) e de 83% para inclinação de trabalho de 45°, considerando a carga térmica de 10W. Para o termossifão

com nanofluido de óxido de grafeno com concentração volumétrica de 2,5%, essa redução máxima na resistência térmica, considerando a carga térmica de 10W, foi de 94% para ambas as inclinações de operação testadas.

Alguns fatores capazes de explicar o aprimoramento no desempenho térmico dos termossifões, a partir da utilização do nanofluido de óxido de grafeno, são: as propriedades termofísicas aprimoradas dos nanofluidos em comparação ao fluido base; e, a diminuição do gradiente de temperatura na parede, fato observado na Figura 14, pela condição isotérmica no condensador e no evaporador do dispositivo passivo de transferência de calor.

Em relação às diferentes concentrações do nanofluido de óxido de grafeno, para as duas inclinações de trabalho, e, em toda a faixa de aplicação da carga térmica, o termossifão com concentração volumétrica de óxido de grafeno de 2,5% (GO 2,5%) apresenta uma diminuição na resistência térmica; por consequência, têm um acréscimo no desempenho térmico, em comparação ao termossifão com concentração volumétrica de óxido de grafeno de 5,0% (GO 5,0%). As maiores reduções relativas são apresentadas para a carga térmica de 45W, onde, na posição vertical, o valor é de 70%, enquanto que, para a posição inclinada de 45°, é de 74%.

Finalmente, destaca-se que o nanofluido de óxido de grafeno irá apresentar uma concentração ótima, em função das características da aplicação, e, considerando a relação diretamente proporcional entre concentração de nanopartículas e viscosidade do nanofluido, a diferença observada, pode estar relacionada ao aumento da viscosidade dinâmica para o fluido de trabalho com concentração volumétrica de 5,0%, em relação ao de 2,5%. Além disso, para concentrações maiores, há maior possibilidade de problemas relacionados à sedimentação e aglomeração das nanopartículas, resultando em piora no desempenho térmico.

## CONCLUSÕES

Considerando os resultados obtidos, foram observadas diminuições consideráveis na temperatura de operação e na resistência térmica do termossifão, a partir da utilização de nanofluido de óxido de grafeno como fluido de trabalho, em relação à utilização de água destilada. Essas reduções foram de até 36% na temperatura de operação e de 83% para a resistência térmica, na configuração do termossifão com nanofluido de óxido de grafeno com concentração volumétrica de 5,0% (GO 5,0%) e para o nanofluido de óxido de grafeno com concentração volumétrica de 2,5% (GO 2,5%) as reduções máximas na temperatura de operação e na resistência térmica foram iguais a 38% e 94%, respectivamente.

As propriedades termofísicas aprimoradas dos nanofluidos de óxido de grafeno, em comparação ao fluido base, e a diminuição do gradiente de temperatura na parede do termossifão foram fatores que explicam essa melhoria no desempenho térmico do dispositivo. Dessa forma, para o termossifão, a utilização de nanofluido de óxido de grafeno

representou um aperfeiçoamento substancial em seu desempenho térmico, e além disso, a concentração volumétrica de 2,5% (GO 2,5%) demonstrou os resultados otimizados entre os fluidos de trabalho analisados.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

## REFERÊNCIAS

AGUIAR, V. M. Influência da razão de preenchimento e da inclinação no desempenho térmico de termossifões. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 118 p., 2016.

ANTONINI ALVES, T.; KRAMBECK, L.; SANTOS, P. H. D. Heat pipe and thermosyphon for thermal management of thermoelectric cooling. In: ARANGUREN, P. (Org.). Bringing thermoelectricity into reality. InTech, London, UK, 2018.

GHORABAE, H.; EMAMI, M. R. S.; MOOSAKAZEMI, F.; KARIMI, H.; CHERAGHIAN, G.; AFRAND, M. The use of nanofluids in thermosyphon heat pipe: A comprehensive review. *Powder Technology*, v. 394, p. 250-269, 2021.

HOLMAN, J. P. Experimental methods for engineers. McGraw-Hill Science, Singapore City, SGP, 739p., 2011.

HUMMERS, W. S.; OFFEMAN, R. E. Preparation of graphitic oxide. *Journal of the American Chemical Society*, v. 80, p. 1339, 1958.

IANCZKOVSKI, H. Análise experimental do desempenho térmico de termossifões e tubos de calor contendo nanofluido de óxido de grafeno. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 91 p., 2022.

JOUHARA, H.; CHAUHAN, A.; NANNOU, T.; ALMAHMOUD, S.; DELPECH, B.; WROBEL, L.C. Heat pipe based systems - Advances and applications. *Energy*, v. 128, p. 729–754, 2017.

MACHADO, P. L. O. Sistema híbrido fotovoltaico/térmico para geração de energia elétrica e aquecimento de água utilizando termossifões. Dissertação (Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 171 p., 2022.

MALDONADO, J. M.; DE GRACIA, A.; CABEZA, L. F. Systematic review on the use of heat pipes in latent heat thermal energy storage tanks. *Journal of Energy Storage*, v. 32, article 101733, 2020.

NIKOLAYEV, V. S. Physical principles and state-of-the-art of modeling of the pulsating heat pipe: A review. *Applied Thermal Engineering*, v. 195, article 117111, 2021.

RAMOS, J.; CHONG, A.; JOUHARA, H. Experimental and numerical investigation of a cross flow air-to-water heat pipe-based heat exchanger used in waste heat recovery. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 102, p. 1267–1281, 2016.

REAY, D. A.; MCGLEN, R.; KEW, P. Heat pipe: Theory, design and applications. Butterworth-Heinemann, Amsterdam, NED, 288 p., 2018.

# MICROSTRUCTURE AND PLASTIC FLOW OF DUPLEX STAINLESS STEEL IN HOT TORSION TEST

*Data de aceite: 01/07/2024*

**Jean Robert Pereira Rodrigues**

**Antônio Santos Araujo Júnior**

**José Roberto Pereira Rodrigues**

**Wellinton de Assunção**

**Fernando Lima de Oliveira**

**Moisés dos Santos Rocha**

**Sebastião Raimundo de Jesus Belém  
Leitão Filho**

**Fabio Alejandro Carvajal Florez**

**ABSTRACT:** duplex stainless steels are used in many industrial applications due to their combination of mechanical properties and resistance to corrosion. The hot deformation of these two-phase materials is still a critical issue due to the different mechanical responses of austenite and ferrite, which often lead to the appearance of imperfections. In this paper, the duplex stainless-steel DIN W. Nr. 1.4462 has been subjected to hot torsion tests with deformation rates of  $0.3 \text{ s}^{-1}$ ,  $0.5 \text{ s}^{-1}$ , and  $1 \text{ s}^{-1}$  at temperatures of  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  and  $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ . The microstructural changes produced as a

consequence of the different test conditions were analyzed by optical microscopy. The characteristics of the plastic flow curves have been interpreted in terms of the localized flow parameters as a mechanism for accommodating deformation during the hot torsion. As a result, two types of microstructures have been obtained in which austenite particles appear by percolating the ferrite matrix in the case of cold rolled steel and disperse in the case of heat-treated steel at  $1250 \text{ }^\circ\text{C}$  for 1 h. Each of these types of microstructure presented characteristic plastic flow curves and microstructural behavior in which it was evidenced the occurrence of the phenomenon of localized plastic flow in both cases, only for the deformation rates below  $1 \text{ s}^{-1}$ .

**KEYWORDS:** Industrial applications; Steel; Microstructure; Deformation rates.

## INTRODUCTION

The development of new materials, in order to meet the demands of the accelerated pace of technological advances that are present today, has become a necessity in the centers of technological research. This trend forces professionals

in this area to seek solutions that respond to the needs that arise from different sectors of the industry, which has sought to improve its production process at all levels (Momeni et al. 2014).

Studies in metal processing have been seeking optimization in production methods through scientific and technological development to understand more deeply the microstructural behavior of these materials during their processing, in order to better control their properties. The investigation of these aspects often becomes impractical to be carried out in the industry itself due to the dimensions of the equipment and materials involved in the process. The solution is to use laboratories where it can be executed experiments that simulate the stages of industrial processing and thus allow the control of the parameters involved (Soares et al., 2017).

Traction, compression and torsion tests have been used with some frequency in the simulation of industrial operations such as lamination, forging and extrusion. The hot torsion test has been one of the most used by scientists, because of the advantages of using a test body with geometry that undergoes little variation with torsion, allowing large levels of deformation. This type of test also makes it possible to monitor microstructural evolution throughout the deformation process by means of interrupted tests, in addition to the ability to simulate industrial processes with multi-pass tests, allowing variation in deformation rates and temperature during the test (Traphöner et al., 2018).

Often, the execution of these tests faces difficulties related to the chemical composition of the material as well as its microstructural characteristics, as in biphasic steel. In these kinds of steel, the combination of two phases with different properties makes the relationship between the mechanisms involved in hot processing more complex (Li and Gao, 2020).

A specific case of two-phase steel is the duplex stainless steel, which has features an excellent combination of mechanical strength and corrosion resistance. However, they need special care during hot mechanical processing, due to the existence of an area of low ductility during the execution, which may compromise the final and expected properties (Patra et al., 2016).

Faced with these demands, this study aims to study the correlation between the microstructure and the plastic runoff of the duplex DIN W stainless steel. Nr. 1.4462, when subjected to hot work by means of torsion tests, with the application of metallurgical parameters for the verification of the occurrence or non-occurrence of the flow phenomenon located in the ferritic matrix.

## MATERIAL AND METHODS

The workpiece material used in the experiments was DIN W. Nr. 1.4462 duplex stainless steel in the form of cylindrical bars (diameter 110 mm and length 230 mm). Table 1 shows the chemical composition of this steel.

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	P	S	N	Fe
0,037	0,48	1,80	22,2	3,03	5,58	0,22	0,002	0,12	base

Table 1 - Chemical composition of DIN W. Nr. 1.4462 duplex stainless steel (%weight)

After the tests, the samples were prepared for microstructural observation, in which they were taken from the test bodies in order to obtain the best use of the usable area. Considering that the tension, deformation and deformation rate vary along the radius of the cross-section of the test body, it is usually used only a thin layer, close to the surface, for microstructural analysis. Therefore, observations were made on the external surface of the samples, Fig. 1.

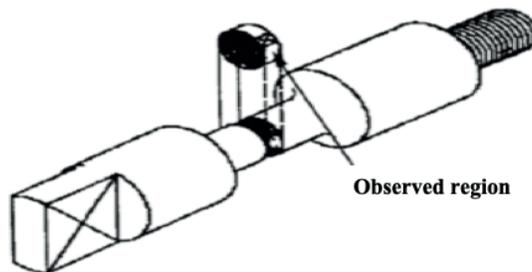


Figure 1 - Indication of the cut in the useful part of the sample and region and to be observed

The steps of preparation of the samples for metallographic observation and analysis were carried out from the cutting of the usable part of the test body. The material removed was embedded in bakelite and sanded using sandpaper 180, 240, 320, 400, 600, 1200, and 2000. The samples were polished with chromium oxide in a polisher until a mirrored surface was obtained. The microstructure was revealed by chemical attack with a reagent called Behara II, whose chemical composition contains 40 ml of distilled water, 20 ml of hydrochloric acid, 2.4 g of ammonia bifluoride and 0.6 g of potassium bisulphite.

The production of the microstructures was carried out with the aim of scanning the entire surface of each sample, obeying an alignment criterion, where the lower lateral edge of the visible part of the embedded samples was arranged parallel to the lower lateral edge of the microscope tray, allowing the monitoring of the microstructural evolution relative to the deformations performed in the test bodies. This methodology made it possible to select

the images that best represent the microstructural behavior, where it was possible to filter the images that presented some type of flaw relative to the phases of sanding, polishing, and chemical attack.

The hot torsion tests were carried out on a horizontal hot torsion test machine connected to a computerized data acquisition system, as shown in Fig. 2. A radiation furnace of maximum power of 6 kW was used, in which the test bodies were involved by a quartz tube, within which the argon gas circulates, to protect against oxidation. Through this tube, water is injected at the end of each test to “freeze” the microstructures.



Figure 2. Hot torsion test machine

The equivalent stress-deformation ratio is used to provide material responses to mechanical stress. Measures of the rotation angle carried out by the rotation transducer shall be used to calculate the deformation and deformation rate. The rotation angle of the machine is calculated by Eq. 1.

$$\theta = \frac{2\pi}{90} \cdot l \quad (1)$$

Being  $l$  the reading registered.

For equivalent deformation by Eq.2.

$$\varepsilon = \frac{R \cdot \theta}{\sqrt{3} \cdot L} \quad (2)$$

where,

$\theta$  is the rotation angle;

R e L are the radius and the useful length of the specimen;

where  $L$  is the useful length of the test body. The deformation rate shall be calculated by dividing the deformation by the total test time. The equivalent voltage is calculated by Eq. 3.

$$\sigma = \frac{\sqrt{3} \cdot M}{2 \cdot \pi \cdot R^3} (3 + m + n) \quad (3)$$

Where:

$M$  is the applied torque;

$R$  e  $L$  are the radius and the useful length of the specimen;

The coefficients  $m$  and  $n$  represent the material's sensitivity to changes in strain rate and strain, respectively;

In which  $M$  is the twisting moment,  $R$  is the test body radius and  $m$  and  $n$  are the material's coefficients of sensitivity to the deformation rate and to the hardening, respectively, where  $n$  is the coefficient that is related to the inclination of the  $\ln m \times \ln \theta$  curve. The coefficient of sensitivity to the deformation rate is determined by the inclinations of the curve  $\log m \times \log \varepsilon$  (Traphöner et. al., 2018; Soares et. al., 2017; Jonas et. al., 2013).

Initially, five isothermal and continuous torsion tests were carried out until fracture. These tests were carried out in heating as shown in Fig.3 with hot and cold rolled steel. In both cases, the tests were carried out at a temperature of 1150 °C with a one-minute soaking time, following a sequence of deformation rates of 0.3 s<sup>-1</sup>, 0.5 s<sup>-1</sup> and 1.0, s<sup>-1</sup>. The purpose of these tests was to reveal a percolated microstructure and to show plastic flow curves with characteristics that would allow the calculation of flow indication parameters located in the samples tested.

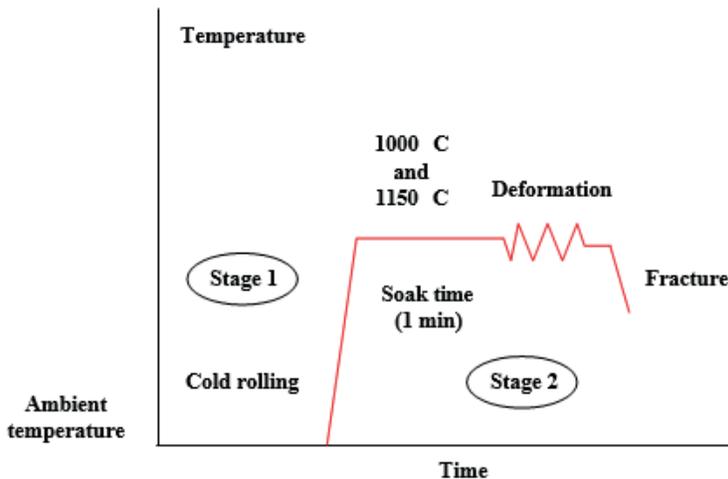


Figure 3. Schematic representation of cold rolled steel tests.

## RESULTS AND DISCUSSION

Figure 4 shows the initial and final microstructures for the test carried out in heating at 1150 °C from the cold rolled material, the test body of which has been kept at this temperature for 1 min and then deformed by hot twisting at a rate of 0.3 s<sup>-1</sup> until fracture.

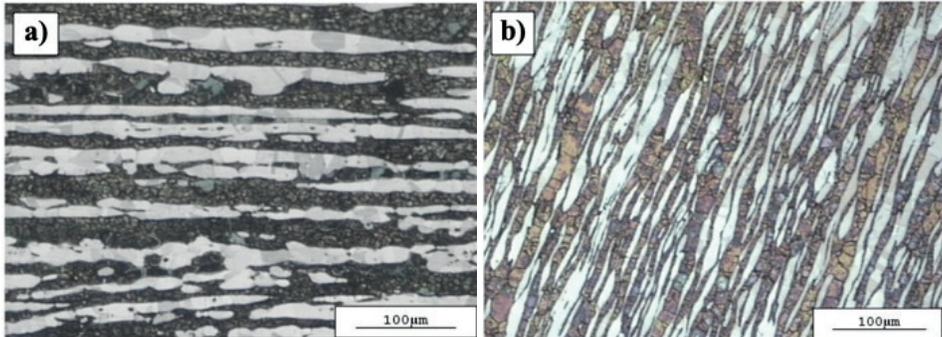


Figure 4. Relative microstructures for the test carried out at 1150 °C with a deformation rate of 0.3 s<sup>-1</sup> and deformed until fracture using cold rolled steel, where (a) represents the initial microstructure before deformation and (b) represents the final microstructure deformed fracture  $\epsilon_f=2.2$

It is possible to see in the initial microstructure that austenite appears in the form of plates aligned with the direction of lamination, while in the final microstructure the austenite plates align with the direction of deformation, becoming fragmented.

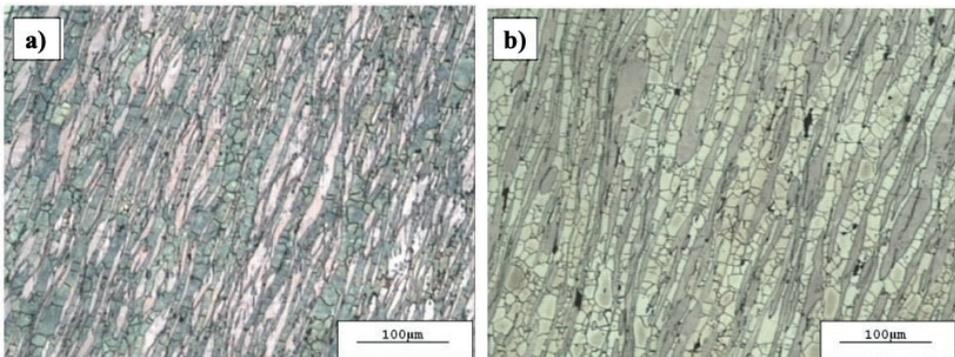


Figure 6. Microstructures for tests performed at 1150 °C with deformation rates of (a) 0.5 s<sup>-1</sup> and (b) 1 s<sup>-1</sup> using cold rolled steel deformed  $\epsilon_f = 3.0$  and  $\epsilon_f = 2.5$ , respectively

Figure 6 shows the set of plastic flow curves obtained in experiments with cold rolled steel. It is observed that the tension increases with the deformation imposed until it reaches a maximum point, then decreases until rupture, denoting a typical behavior of metallic materials, in which the curves have a hardening region, followed by softening after a peak of tension. There is also a long hardening region up to the peak and an extensive region of softening after the peak. The difference between peak voltage and initial flow voltage is not so marked.

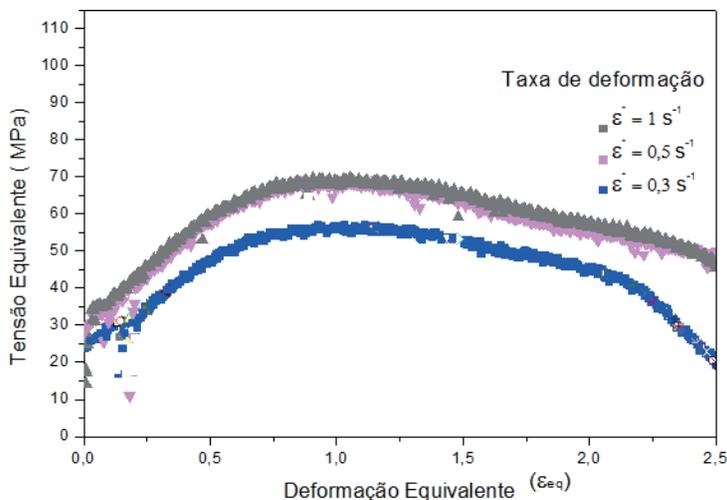


Figure 6. Plastic flow curves from tests performed at 1150 °C with deformation rates of 0.3 s<sup>-1</sup>, 0.5 s<sup>-1</sup> and 1 s<sup>-1</sup> using cold rolled steel.

Tests performed at 1000 °C with a deformation rate of 1 s<sup>-1</sup> using cold rolled steel were intended to complement studies on the occurrence of plastic instability or localized flow in tests performed at 1150 °C. Figures 7 to 8 show, respectively, the plastic flow curves and the microstructural evolution referring to these tests, where test bodies made from cold rolled steel were used. In this case, the temperature of 1000 °C and a deformation rate equal to 1 s<sup>-1</sup> were used, generating higher peak voltages than those of the tests made with the same steel at 1150 °C also with a rate of 1 s<sup>-1</sup>.

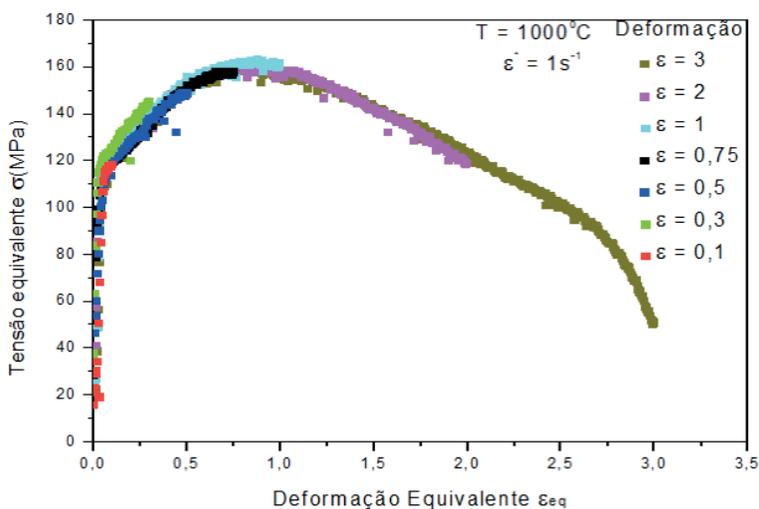


Figure 7. Curves and microstructures for tests conducted at 1000 °C with a deformation rate of 1 s<sup>-1</sup> using cold rolled steel

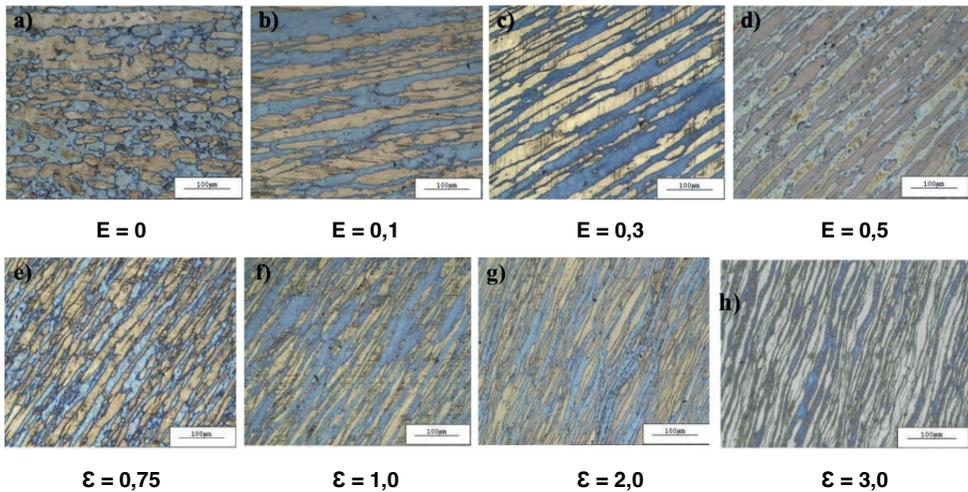


Figure 8 - Cold rolled duplex stainless steel microstructures with different deformations; test temperature 1000 °C and deformation rate 1 s<sup>-1</sup>

The ferritic phase is more ductile than the austenitic phase when subjected to the hot deformation under similar conditions. It is also known that the starting stresses of plastic flow from ferrite and duplex steel are close, indicating that in the case of duplex, the deformation is concentrated in the ferritic matrix at the beginning of the test, leading to the occurrence of flow located there, which is softer than in the austenitic phase (Kingklang and Uthaisangsuk, 2017). Such a phenomenon can be observed by analyzing the microstructures shown in Figures 2 and 3, where distortions with a winding aspect can be noticed, indicating the occurrence of flow located in this stage of deformation.

## CONCLUSIONS

The experiments carried out in this study led to the following conclusions:

- Tests using different initial microstructures have shown that the behavior of the plastic flow curves is influenced by the initial disposition of austenite particles in the ferritic matrix and metallurgical parameters.
- It has been observed and quantified that for the microstructure with austenite roughly dispersed and percolated from duplex stainless-steel DIN W. Nr. 1.4462, heat-treated at 1350 °C and tested at 1150 °C occurred the flow phenomenon located at the rates of 0.3 s<sup>-1</sup>, 0.5 s<sup>-1</sup>, 1 s<sup>-1</sup>, 3 s<sup>-1</sup>, and 5 s<sup>-1</sup>.
- It has been observed and quantified that for the microstructure with austenite roughly dispersed and percolated from duplex stainless steel DIN W. Nr. 1.4462, heat-treated at 1250 °C, tested at 1150 °C and deformed with deformation rate below 1 s<sup>-1</sup>, the phenomenon of the localized flow occurred.

- It has been observed and quantified that for the microstructure with austenite roughly dispersed and percolated from duplex stainless steel DIN W. Nr. 1.4462, heat-treated at 1250 °C, tested at 1150 °C and deformed with deformation rate below 1 s<sup>-1</sup>, the phenomenon of the localized flow occurred.
- It has been observed and quantified that for the microstructure with percolated austenite from duplex stainless steel DIN W. Nr. 1.4463, heat-treated at 1350 °C and tested at 1000 °C it didn't occur the phenomenon of localized flow at the rates of 0.3 s<sup>-1</sup>, 0.5 s<sup>-1</sup>, 1 s<sup>-1</sup>, 3 s<sup>-1</sup>, and 5 s<sup>-1</sup>.
- The tension drop after the peak, observed in the plastic flow curves, is related to the occurrence of flow located in the ferritic matrix associated with the fragmentation of the austenite particles during processing, as well as the phenomena of dynamic recovery and recrystallization, typical of duplex stainless steels.
- There has been the emergence of cavities in triple and parallel junctions of the interfaces of the austenitic and ferritic phases as a consequence of the accumulation of deformation in them.

## ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful to IFMA for financial support.

## AUTHORAL RESPONSIBILITY

The authors are solely responsible for the content of this article.

## REFERENCES

Jonas, J. J., Sellars, C. M. & Tegart, W. J. McG. (2013). Strength and structure under hot-working conditions. Volume 14, 1969 - Issue 1. Pages 1-24. Doi: <https://doi.org/10.1179/mtrl.1969.14.1.1>.

Kingklang, S., Uthaisangsuk, V. (2017). Investigation of Hot Deformation Behavior of Duplex Stainless Steel Grade 2507. *Metallurgical and Materials Transactions A*, volume 48, pages 95–108. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11661-016-3829-4>.

Li, J., Ren, X. & Gao, X. (2020). Effect of superplastic deformation on microstructure evolution of 3207 duplex stainless steel. *Materials Characterization*, Volume 164, Pages 41-50. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110320>.

Momeni, A., Abbasi, S. M., Morakabati, M., Badri, H. & Wang, X. (2014). Dynamic recrystallization behavior and constitutive analysis of Incoloy 901 under hot working condition. *Materials Science and Engineering: A*, Volume 6156, Pages 51-60. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.07.060>.

Patra, S., Ghosh, A., Kumar, V., Chakrabarti, D. & Singhal, L. K. (2016). Deformation induced austenite formation in as-cast 2101 duplex stainless steel and its effect on hot-ductility. *Materials Science and Engineering: A*, Volume 66013, Pages 61-70. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.02.067>.

Soares, G. C., Gonzalez, B.M. & Santos, L. A. (2017). Strain hardening behavior and microstructural evolution during plastic deformation of dual phase, non-grain oriented electrical and AISI 304 steels. *Materials Science and Engineering: A*, Volume 684, Pages 577-585. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.12.094>.

Traphöner, H., Heibel, S., Clausmeyer, T. & Tekkaya, A. E. (2018). Influence of manufacturing processes on material characterization with the grooved in-plane torsion test. *International Journal of Mechanical Sciences*, Volumes 146–147, Pages 544-555. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.12.052>.

# MODELAGEM E SIMULAÇÃO DA PIRÓLISE DE BIOMASSA EM REATOR DE LEITO FLUIDIZADO

Data de submissão: 08/05/2024

Data de aceite: 01/07/2024

### Alysson Dantas Ferreira

Universidade Federal de Campina Grande  
Campina Grande -PB  
<http://lattes.cnpq.br/3415847633690777>

### Suzana Dantas

Universidade Federal de Campina Grande  
Campina Grande -PB  
<http://lattes.cnpq.br/8371474392585192>

### Severino Rodrigues de Farias Neto

Universidade Federal de Campina Grande  
Campina Grande -PB  
<http://lattes.cnpq.br/5029314237107938>

**RESUMO:** A pirólise vem se destacando na produção de biogás, bio-óleo e biocarvão. Portanto, é de fundamental importância possuir modelos matemáticos capazes de representar seus fenômenos, de modo a possibilitar a otimização dos processos. Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo simular o comportamento da pirólise em um reator de leito fluidizado. Para tanto, empregou-se uma abordagem Euleriana-Lagrangeana em fluidodinâmica computacional (CFD) para descrever o comportamento e a interação das fases. Resolveu-se as equações de massa, quantidade de movimento, energia e

espécie química acoplada com o modelo de partícula DPM. Adotou-se um modelo multicomponente e multiestágio para descrever a cinética da pirólise em dois tipos diferentes de biomassa. Os resultados numéricos obtidos mostraram uma discrepância de 3,4% no estudo da reação de pirólise para a celulose pura e 1,66% para o bagaço de cana-de-açúcar, quando comparado com os dados experimentais relatados na literatura. Portanto, conclui-se que o modelo proposto conseguiu representar de forma satisfatória o comportamento da pirólise de mais de um tipo de biomassa, o que nos permite realizar estudos de otimização nos parâmetros operacionais e geométricos em reatores.

**PALAVRAS-CHAVE:** CFD, Cana-de-açúcar, Celulose, OpenFoam

### MODELING AND SIMULATION OF BIOMASS PYROLYSIS IN FLUIDIZED BED REACTOR

**ABSTRACT:** Pyrolysis has been gaining prominence in the production of biogas, bio-oil, and biochar. Therefore, it is of fundamental importance to possess mathematical models capable of representing its phenomena, to enable process optimization. In this context,

the present study aimed to simulate the behavior of pyrolysis in a fluidized bed reactor. To do so, an Eulerian-Lagrangian approach in computational fluid dynamics (CFD) was employed to describe the behavior and interaction of the phases. The equations of mass, momentum, energy, and chemical species coupled with the DPM particle model were solved. A multicomponent and multi-stage model was adopted to describe the kinetics of pyrolysis in two different types of biomasses. The numerical results obtained showed a discrepancy of 3.4% in the study of pyrolysis reaction for pure cellulose and 1.66% for sugarcane bagasse when compared to experimental data reported in the literature. Therefore, it is concluded that the proposed model was able to satisfactorily represent the behavior of pyrolysis of more than one type of biomass, allowing for optimization studies in operational and geometric parameters in reactors.

**KEYWORDS:** CFD, Sugarcane, Cellulose, OpenFoam

## INTRODUÇÃO

Existem diversos processos para converter biomassa em biocombustíveis. Entre os principais, a pirólise se destaca como um dos mais favoráveis para a produção de bio-óleo, gerando uma fase gasosa (biogás) e uma fase sólida (biocarvão) como subprodutos (CLISSOLD et al., 2020; MIRANDA et al., 2021). Neste processo, a biomassa é degradada termicamente em uma atmosfera inerte (na ausência de oxigênio) e em temperaturas moderadas. Essa decomposição pode durar de alguns segundos a várias horas (CLISSOLD et al., 2020).

Durante o processo de pirólise, ocorre a quebra das longas e complexas cadeias de hidrocarbonetos em moléculas menores e mais simples, gerando seus produtos. As variáveis que mudam de um processo de pirólise para outro são a taxa de aquecimento da biomassa, influenciada pelo tipo de biomassa e temperatura utilizada, e o tempo de residência da biomassa no reator, manipulado através da vazão do gás inerte e do tamanho das partículas. BENEVIDES (2015) afirma que podemos classificar a pirólise como lenta (ou carbonização), rápida e flash com base na taxa de aquecimento.

Apirólise lenta é caracterizada por longos tempos de residência, taxas de aquecimento da biomassa em torno de 2 °C/s e temperaturas de operação mais baixas (inferiores a 500 °C) do que a pirólise rápida. Neste processo, a formação de biochar é favorecida, tornando-se o principal produto da reação (BRIDGWATER 2012; BROWNSORT 2009; BATISTA JUNIOR 2017). Por outro lado, a pirólise rápida ocorre em altas temperaturas (cerca de 500 °C) com uma taxa de aquecimento na faixa de 10 a 100 °C/s e tempos de residência muito curtos, entre 0,5 e 5 segundos (BROWNSORT 2009). De acordo com BRIDGWATER (2012), o principal produto neste tipo de pirólise é o bio-óleo, com um rendimento de cerca de 50-75%, dependendo da composição da biomassa. No entanto, aumentar o tempo de residência do bio-óleo no reator pode favorecer a formação do biogás através de reações secundárias.

O desenvolvimento de modelos computacionais contribui para a otimização do processo e o desenvolvimento de novos reatores de pirólise, pois permitem analisar e encontrar os melhores parâmetros operacionais e as melhores configurações geométricas do equipamento. Diante disso, muitos estudos utilizam a Fluidodinâmica Computacional (CFD) para modelar a pirólise de biomassa em reatores. Alguns pesquisadores, como PAPADIKIS et al. (2009<sup>a</sup>; 2009<sup>b</sup>) e FERREIRA et al. (2023) utilizaram o design experimental para analisar o impacto da temperatura, velocidade e diâmetro da partícula na conversão da reação de pirólise da madeira usando um modelo cinético semi-global de duas etapas. HU et al. (2019) utilizaram CFD-DEM para modelar reações de pirólise rápida e investigaram os efeitos da contração e da velocidade superficial do gás. PARK E CHOI (2019) estudaram a influência da temperatura de reação e velocidade do gás na hidrodinâmica, transferência de calor e reações de pirólise. Enquanto isso, YANG et al. (2021) utilizaram o método MP-PIC de abordagem Euler-Lagrange para modelar um reator de leito fluidizado borbulhante tridimensional com o objetivo de estudar a dinâmica física e térmica das bolhas em altas temperaturas.

À luz do exposto, o presente trabalho tem como objetivo propor um modelo matemático capaz de representar o comportamento reacional da pirólise. Para tanto, implementou-se no OpenFOAM um modelo euleriano-lagrangeano e comparou os resultados com dados de literatura para biomassas formadas por bagaço da cana-de-açúcar e da celulose pura.

## MODELAGEM MATEMÁTICA

Para modelar a fase gasosa em um escoamento reativo gás-sólido é necessário considerar quatro equações: a equação de continuidade, a equação de quantidade de movimento, a equação de energia e a equação de espécies químicas. Já para modelar o comportamento da partícula, o presente trabalho utilizou a metodologia do Modelo de Partículas Discretas (DPM). Esse descreve o movimento e as interações das partículas. O modelo de esfera macia foi integrado ao DPM para representar as colisões entre partículas e colisões entre partículas e paredes. As equações que modelam ambas as fases serão apresentadas abaixo.

### Fase gasosa

A equação de continuidade da fase gasosa pode ser formulada como:

$$\frac{\partial(\alpha_g \rho_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \mathbf{u}_g) = \delta \dot{m}_s \quad (1)$$

onde  $\alpha_g$ ,  $\rho_g$ , e  $\mathbf{u}_g$  são, respectivamente, a fração volumétrica, a densidade e a velocidade.  $\delta \dot{m}_s$  representa a taxa de consumo ou geração de massa causada pela interação entre a fase gasosa e a fase particulada.

A equação de quantidade de movimento da fase gasosa pode ser escrita por:

$$\frac{\partial(\alpha_g \rho_g \mathbf{u}_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \mathbf{u}_g \mathbf{u}_g) = -\alpha_g \nabla p_g + \rho_g \alpha_g \mathbf{g} + \nabla \cdot (\alpha_g \boldsymbol{\tau}_g) + \mathbf{F}_{gs} \quad (2)$$

Onde  $p_g$  e  $\mathbf{g}$  são, respectivamente, a pressão do gás e os termos de aceleração gravitacional, o termo  $\boldsymbol{\tau}_g$  representa o tensor de tensão calculado por:

$$\boldsymbol{\tau}_g = (\mu_l + \mu_t)(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3}(\mu_l + \mu_t)(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I} \quad (3)$$

onde  $\mu_l$  e  $\mu_t$  são a viscosidade laminar e turbulenta, respectivamente. O termo  $\mathbf{F}_{gs}$  na Equação 2 representa a troca de momentum entre as fases sólida e a fase gasosa.

A equação de energia da fase gasosa em termos da entalpia pode ser escrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha_g \rho_g h_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \mathbf{u}_g h_g) \\ = \alpha_g \left( \frac{\partial p_g}{\partial t} + \mathbf{u}_g \cdot \nabla p_g \right) - \nabla \cdot (\alpha_g q) + \dot{Q}_D + Q_{gs} + Q_{gw} - \Delta H_{rg} + Q_{rad} \end{aligned} \quad (4)$$

onde  $h_g$  e  $\Delta H_{rg}$  são, respectivamente, a entalpia e o calor da reação química.  $h_g$  é calculado pela adição da entalpia de cada espécie envolvida:

$$h_g = \sum_{k=1}^{N_k} h_g^k Y_g^k = \sum_{k=1}^{N_k} Y_g^k \left( \int_{T_0}^{T_g} C_p^k dT + \Delta h_g^k \right) \quad (5)$$

onde  $N_k$  é o número de espécies químicas presentes na fase gasosa.  $T_0$ ,  $T_g$ ,  $C_p^k$  e  $\Delta h_g^k$  são, respectivamente, a temperatura de referência, a temperatura da fase gasosa, o calor específico da espécie  $k$  e o calor da reação.  $Q_{gs}$  e  $Q_{gw}$  da Equação 4 representam os termos de transferência de calor entre gás-sólido e gás-parede, respectivamente. A transferência de calor convectivo entre a parede e a fase gasosa ( $Q_{gw}$ ) é calculada por:

$$Q_{gw} = h_{gw} A_{gw} (T_w - T_g) \quad (6)$$

onde  $T_w$  e  $A_{gw}$  são, respectivamente, a temperatura e a área superficial da parede.  $\dot{Q}_D$  é a difusão entálpica calculada por:

$$\dot{Q}_D = \sum_{k=1}^{N_k} \nabla \cdot (\alpha_g h_g^k \rho_g D_{if,g}^k \nabla Y_g^k) \quad (7)$$

O fluxo de calor  $q$  é calculado por:

$$q = \lambda_g \nabla T_g \quad (8)$$

onde o termo  $\lambda_g$  é a condutividade térmica da fase gasosa. O termo  $Q_{gs}$  na Equação 4 representa a troca de calor entre a fase gasosa e a fase sólida.

A equação de transporte das espécies gasosas pode ser formulada como:

$$\frac{\partial(\alpha_g \rho_g Y_g^k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \mathbf{u}_g Y_g^k) = \nabla(\alpha_g \rho_g D_{if,g}^k \nabla Y_g^k) + \dot{m}_{\text{react},g}^k + \dot{m}_{\text{react},gs}^k \quad (9)$$

Esta equação é resolvida com base na espécie química  $k$ , e cada elemento computacional é somado para obter a mudança de espécies na mistura gasosa.  $D_{if,g}^k$  é a difusividade de massa turbulenta e  $\dot{m}_{\text{react},g}^k$  modela as reações químicas da fase gasosa para cada espécie química. Este termo é calculado por:

$$\dot{m}_{\text{react},g}^k = \psi_i C_i \quad (10)$$

onde  $k_i$  e  $C_i$  são respectivamente a constante de taxa de reação e a concentração do componente  $i$ . A constante de taxa de reação será detalhada na seção 2.4. O termo  $\dot{m}_{\text{react},gs}^k$  na Equação 9 representa a taxa de consumo ou geração da espécie  $k$  causada pela interação entre a fase gasosa e a fase particulada.

## Fase sólida

A movimentação da partícula  $i$  de massa  $m_i$  e volume  $V_i$  em um sistema é calculada de acordo com a segunda lei do movimento de Newton, dada por:

$$m_i \frac{d\mathbf{u}_{s,i}}{dt} = m_i \frac{d^2 \boldsymbol{\xi}_i}{dt^2} = \mathbf{f}_i^{g-s} + \mathbf{f}_i^{s-w} + \mathbf{f}_i^{\text{grav}} \quad (11)$$

Onde  $\mathbf{u}_{s,i}$  é a velocidade,  $\boldsymbol{\xi}_i$  é a posição da partícula  $i$ ,  $\mathbf{f}_i^{g-s}$  representa as forças atuantes nas partículas devido à interação com fluidos,  $\mathbf{f}_i^{\text{grav}}$  é a força gravitacional na partícula  $i$  e  $\mathbf{f}_i^{s-w}$  é o termo de colisão partícula-parede.

O momento angular de uma dada partícula  $i$  é calculado por:

$$\mathbf{I}_i \frac{d\boldsymbol{\omega}_i}{dt} = \mathbf{M}_i^{g-s} \quad (12)$$

onde  $\mathbf{M}_i^{g-s}$  é o torque causado pelo efeito fluido-partícula.  $\mathbf{I}_i$  é o momento de inércia, que para uma partícula esférica de raio  $r_i$  é calculado por  $\mathbf{I}_i = \frac{2}{5} m_i r_i^2$ .

Cada partícula assume ter uma temperatura uniforme, e assim a conservação de energia da partícula  $i$  em um sistema é calculada por:

$$m_i c_{p,i} \frac{dT_i}{dt} = Q_{gs} + Q_{\text{rad}} + \Delta H_{rs} \quad (13)$$

onde  $c_{p,i}$  e  $T_i$  são a capacidade térmica e a temperatura da partícula  $i$ ,  $Q_{gs}$  é o calor líquido pela interação entre a fase gasosa e a fase de partículas, calculado por:

$$Q_{gs} = \frac{\lambda_g Nu_i}{d_p} A_i (T_g - T_s) \quad (14)$$

onde  $d_p$  e  $A_i$  são o diâmetro e a área superficial da partícula.  $Nu_i$  é o número de Nusselt da partícula calculado por:

$$Nu_i = 2 + 0.6 Re_p^{0.5} Pr^{0.33} \quad (15)$$

Onde  $Pr$  e  $Re_p$  são os números de Prandtl e Reynolds da partícula, respectivamente.  $\Delta H_{rs}$  é o calor de reação da fase sólida, e  $Q_{rad}$  é o efeito da radiação na partícula, calculado por:

$$Q_{rad} = \sigma \epsilon_s A_s (T_{b,local}^4 - T_s^4) \quad (16)$$

onde  $\sigma$  e  $\epsilon_s$  são a constante de Stefan-Boltzmann e a emissividade da partícula.

A Equação 17 calcula a massa de cada partícula  $i$  em um sistema:

$$\frac{dm_i}{dt} = \sum \Omega_i \quad (17)$$

$\Omega_i$  representa o termo fonte de massa que pode aumentar ou diminuir devido à reação química da fase sólida.

A Equação 18 calcula a composição de cada partícula  $i$  presente em um sistema:

$$\frac{d(m_i Y_{i,k})}{dt} = \sum \Omega_{i,k} \quad (18)$$

$\Omega_{i,k}$  representa o termo fonte das espécies químicas presentes nas partículas que podem aumentar ou diminuir devido a uma reação química.

## Interação gás-partícula

O modelo de arrasto desempenha um papel essencial na caracterização de um sistema gás-partícula ao quantificar a transferência de quantidade de movimento entre as fases. Esse modelo é de fundamental importância para entender a complexa dinâmica destes sistemas. A força de arrasto de uma única partícula  $i$  é calculado da seguinte forma:

$$\mathbf{f}_i^{g-s} = \mathbf{f}_{D,i} = \frac{V_p D_p}{1 - \alpha_g} (\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_{s,i}) \quad (19)$$

O modelo de arrasto de Gidaspow é uma abordagem amplamente utilizada para modelagem gás-sólido. Ele combina a correlação de Ergun, adequada para sistemas densos (ERGUN E ORNING, 1949), com a correlação de Wen-Yu, utilizada para sistemas diluídos (YANG et al., 2021). Isso o torna apropriado para uma ampla gama de regimes de fluxo gás-sólido. O modelo de Gidaspow é escrito da seguinte forma:

$$D_p = \begin{cases} \frac{150(1 - \alpha_g)^2 \mu_g}{\alpha_g d_p^2} + \frac{1.75 \rho_g (1 - \alpha_g) |\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_{s,i}|}{d_p}, \alpha_g \leq 0.8 \\ \frac{3 \alpha_g \rho_g (1 - \alpha_g) |\mathbf{u}_g - \mathbf{u}_{s,i}|}{4} C_D \alpha_g^{-2.65}, \alpha_g > 0.8 \end{cases} \quad (20)$$

onde

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_s} (1 + 0.15 Re_s^{0.687}), Re_s < 1000 \\ 0.44, Re_s \geq 1000 \end{cases} \quad (21)$$

A força gravitacional atuando na partícula é dada por:

$$f_i^{grav} = \frac{\mathbf{g}(\rho_g - \rho_s)}{\rho_g} \quad (22)$$

onde  $\rho_s$  é a densidade da partícula  $i$  e  $\mathbf{g}$  é a aceleração da gravidade.

## Cinética

O processo de pirólise rápida de biomassa em reatores envolve numerosas reações elementares (BASHIR et al., 2021; FOONG et al., 2020), o que resulta na formação de vários produtos químicos, como compostos de ácidos orgânicos, cetonas e fenóis. Compostos gasosos, como CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub> e outros hidrocarbonetos de gás de síntese, também são detectados (MADUSKAR et al., 2018). No entanto, devido à complexidade das reações químicas envolvidas, a cinética detalhada da reação e os mecanismos fundamentais de decomposição ainda estão sob pesquisa, e as informações sobre as espécies intermediárias ainda não são completamente compreendidas (YANG et al., 2021).

Nas simulações de CFD, as reações químicas que ocorrem durante a pirólise são tipicamente simplificadas em um conjunto de reações principais que podem capturar efetivamente o comportamento geral do processo. Esquemas de devolatilização global obtidos a partir de experimentos de análise termogravimétrica (TGA) são frequentemente usados para obter esses modelos cinéticos, permitindo estudos de simulação rápida de pirólise de biomassa (XIONG et al., 2014).

A Figura 1 apresenta a cinética multicomponente e multiestágio usada neste trabalho. Esse mecanismo foi proposto por KOUFOPANOS et al. (1989), DI BLASI (1994), WARD E BRASLAW (1985) e MILLER E BELLAN (1997) e já foi estudada anteriormente, no qual foram obtidos resultados satisfatórios (PARK et al., 2019; CLISSOLD et al., 2020).

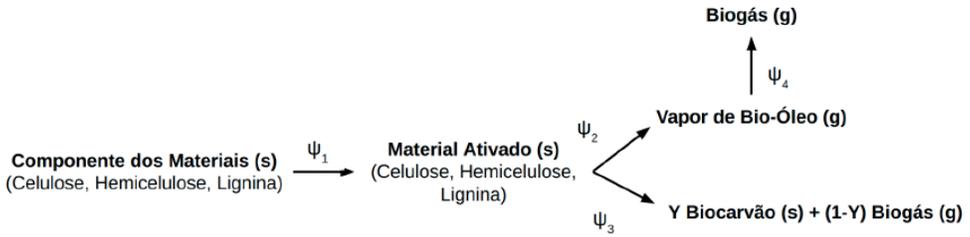


Figura 1 - Mecanismo de reação multicomponente e multiestágio.

Este modelo correlaciona a taxa de pirólise da biomassa com sua composição, conforme mostrado abaixo:

$$\text{Biomassa} = Y_1 \text{Celulose} + Y_2 \text{Hemicelulose} + Y_3 \text{Lignina} \quad (23)$$

Neste modelo, a taxa de reação da biomassa é considerada a soma das taxas de reação de seus principais componentes: celulose, hemicelulose e lignina. Portanto, o peso de cada componente contribui para a formação da biomassa virgem (XUE et al., 2012). Essa suposição considera que as interações potenciais entre os componentes da biomassa têm um efeito negligenciável no decorrer da pirólise. Assim, qualquer matéria-prima de biomassa pode ser modelada com base no conhecimento inicial da composição de celulose, hemicelulose e lignina.

Conforme mostrado na Figura 1, os produtos são agrupados em biocarvão, biogás e bio-óleo. Y representa a taxa de formação para o componente de biocarvão. A lei de Arrhenius é usada para calcular a taxa da reação química e pode ser formulada da seguinte forma:

$$\psi_i = \theta_i \exp\left(\frac{-E_i}{RT}\right) \quad (24)$$

onde R é a constante universal dos gases,  $\theta_i$  é o fator pré-exponencial e  $E_i$  é a energia de ativação. A Tabela 1 detalha os parâmetros cinéticos da reação.

Componentes	Reação	Y of $\psi_3$	$\theta_i$ [s <sup>-1</sup> ]	$E_i$ [J/mol]	$\Delta H_i$ [J/kg]
Celulose <sup>[26]</sup>	$\psi_{c,1}$	-	$2.80 \times 10^{19}$	$2.424 \times 10^5$	0
	$\psi_{c,2}$	-	$3.28 \times 10^{14}$	$1.965 \times 10^5$	$2.55 \times 10^5$
	$\psi_{c,3}$	( $y_c$ ) 0.35	$1.30 \times 10^{10}$	$1.505 \times 10^5$	$-2.55 \times 10^5$
Hemicelulose <sup>[23]</sup>	$\psi_{h,1}$	-	$2.10 \times 10^{16}$	$1.867 \times 10^5$	0
	$\psi_{h,2}$	-	$8.75 \times 10^{15}$	$2.024 \times 10^5$	$2.55 \times 10^5$
	$\psi_{h,3}$	( $y_h$ ) 0.60	$2.60 \times 10^{11}$	$1.457 \times 10^5$	$-2.55 \times 10^5$
Lignina <sup>[23]</sup>	$\psi_{l,1}$	-	$9.60 \times 10^8$	$1.076 \times 10^5$	0
	$\psi_{l,2}$	-	$1.50 \times 10^9$	$1.438 \times 10^5$	$2.55 \times 10^5$
	$\psi_{l,3}$	( $y_l$ ) 0.75	$7.70 \times 10^6$	$1.114 \times 10^5$	$-2.55 \times 10^5$
Bio-óleo <sup>[27]</sup>	$\psi_{t,4}$	-	$4.28 \times 10^6$	$1.080 \times 10^5$	$-4.2 \times 10^4$

Tabela 1 - Arrhenius parameters for the multicomponent scheme.

De acordo com DI BLASI (1994), KOUFOPANOS et al. (1991) e CURTIS E MILLER (1988), as entalpias das reações foram obtidas a partir de medidas realizadas apenas para a celulose; no entanto, esses valores também são usados para o cálculo da hemicelulose e da lignina. DI BLASI (1994) afirma que a primeira reação ( $\psi_1$ ) da biomassa virgem para os componentes ativos tem uma liberação de calor muito pequena, que pode ser negligenciada. KOUFOPANOS et al. (1991) relatam que a reação de formação de alcatrão ( $\psi_2$ ) endotérmica. Tanto a formação de carvão quanto de gás ( $\psi_3$ ) quanto a craqueamento secundário do vapor de bio-óleo ( $\psi_4$ ) são exotérmicos.

## CONSIDERAÇÕES PARA A SIMULAÇÃO

O presente trabalho foi baseado em um estudo conduzido por XUE et al. (2012) e SUTTIBAK (2017), que investigaram experimentalmente a pirólise de celulose pura e bagaço de cana-de-açúcar em um reator fluidizado borbulhante, respectivamente. Para acelerar as simulações sem comprometer a qualidade dos resultados, o leito de partículas foi simplificado e o modelo de partícula única foi adotado, conforme realizado por FERREIRA et al. (2023) e PAPADIKIS et al. (2009<sup>b</sup>). Esses estudos demonstraram que essa abordagem de modelagem fornece uma estimativa razoável do progresso da reação de pirólise, produzindo conversões precisas e rendimentos de produtos se as condições de contorno forem ajustadas para o modelo usado. Além disso, a geometria proposta por XUE et al. (2012) e SUTTIBAK (2017) foi simplificada para um formato pseudo-2D com uma espessura de 7 mm. Essa simplificação foi baseada no trabalho de LI et al. (2012), que concluiu que a espessura do reator fluidizado deve ser pelo menos 12,3 vezes o tamanho da partícula para negligenciar o efeito da parede e garantir que não influencie no comportamento das partículas. Essa consideração foi validada por HU et al. (2019), XUE et al. (2012) e FERREIRA et al. (2023).

A precisão das simulações de CFD é influenciada pelo número de elementos da malha computacional. Um maior número de elementos leva a uma melhor precisão, mas também aumenta os custos computacionais e o tempo de cálculo (VERSTEEG E MALALASEKERA, 2007). Em simulações de CFD que utilizam a abordagem Euleriana-Lagrangeana resolvida pelo método DPM, o tamanho do elemento da malha deve considerar o tamanho da partícula, em que ela deve ser pequena o suficiente para obter uma boa precisão e grande o suficiente para garantir uma variação temporal e espacial adequada das frações de partículas sólidas (HU et al., 2019). Diante disso, é recomendável seguir as sugestões de estudos anteriores ao determinar os tamanhos adequados de malha e partícula (HU et al., 2019).

No trabalho realizado por BOYCE et al. (2015), recomendou-se uma razão ( $S_c/d_p$ ) entre 3 e 4 para obter o melhor resultado entre dados experimentais e resultados numéricos em problemas de leito fluidizado. Assim, no presente estudo, seguimos essas recomendações e adotamos uma razão ( $S_c/d_p$ ) de 3. Conseqüentemente, criamos uma malha computacional de 20x4x176 elementos nas direções x, y e z. A Figura 2 apresenta o domínio estudado e o resultado da malha computacional usadas neste trabalho.

Os modelos estudados neste trabalho foram implementados no OpenFOAM-v2012, um programa gratuito e de código aberto. Aproveitando-se dessa característica, modificou-se o *solver reactingParcelFoam*, que é usado para resolver problemas transientes com escoamento compressível, turbulento, com reação química, com partícula multifásica e modelos de filme de superfície, adicionando em seu código o modelo DPM, de modo a considerar os efeitos da fração volumétrica das partículas na fase contínua, além de inserir as colisões entre as partículas e entre as partículas paredes. Além disso, submodelos com a cinética de reação de pirólise heterogênea foram implementados no código-fonte do *software*.

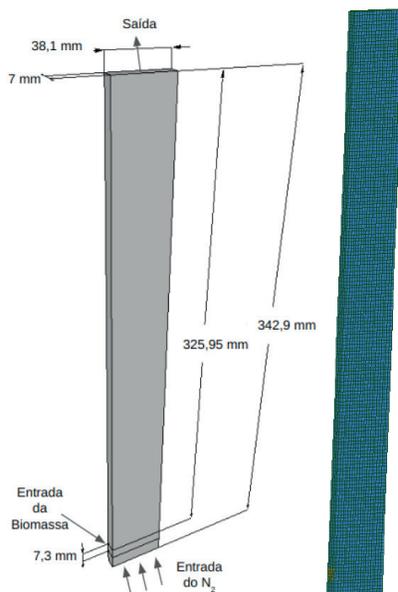


Figura 2 - Geometria e malha do leito fluidizado.

O presente estudo realizou duas simulações, cada uma com uma partícula de biomassa diferente: celulose pura e bagaço de cana-de-açúcar. As composições de cada biomassa estão apresentadas na Tabela 2.

	Celulose Pura*	Cana-de-Açúcar**
Celulose	1.0	0.43
Hemicelulose	0.0	0.34
Lignina	0.0	0.23

\*XUE et al. (2012), \*\*SUTTIBAK (2017)

Tabela 2. Composição das biomassas estudadas.

Nas simulações, uma única partícula de biomassa foi considerada e inserida no centro do reator, a uma altura de 0,01905 m, com uma velocidade de 0 m/s e uma temperatura de 303 K. O fluxo de entrada consistia apenas de nitrogênio, que entrava pela base do reator a uma temperatura de 773 K e uma velocidade fixa. O valor da velocidade foi ajustado para cada cenário com base no tempo de residência da fase gasosa obtido a partir dos experimentos relatados por XUE et al. (2012) (0,18m/s) e SUTTIBAK (2017) (0,21 m/s). A saída do reator foi definida à pressão atmosférica (101325 Pa), e as paredes foram assumidas como não deslizantes e adiabáticas. Inicialmente, o reator estava preenchido por N<sub>2</sub> estagnado a uma temperatura de 303 K.

A partícula possui uma condutividade térmica e calor específico calculados proporcionalmente com base na fração de massa sólida (celulose, hemicelulose, lignina e carvão). Quando a biomassa é aquecida, ela passa por um processo chamado pirólise, que é a quebra de seus componentes em celulose ativa, hemicelulose ativa e lignina ativa. Esses compostos então produzem biocarvão, bio-óleo e biogás. As propriedades do N<sub>2</sub>, dos gases de pirólise e da biomassa podem ser encontradas na Tabela 3.

	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$d_p$	$\mu$ [Pa s]	$\lambda$ [W/mK]	$C_p$ [J/kgK]
Celulose Pura*	400	5e-5	-	0,3	2300
Cana-de-açúcar**	120	5e-4	-	0,1	2468
Biocarvão*	2333	-	-	0,1	1100
N <sub>2</sub> *	Gás ideal	-	3e-5	3.58e-2	1121
Biogás*	Gás ideal	-	3e-5	2.577e-2	2500
Bio-óleo*	Gás ideal	-	3e-5	2.577e-2	1100

\*YANG et al. (2021), \*\*Almeida (2008)

Tabela 3. Parâmetros da simulação.

Para completar cada simulação, um tempo físico de 10 segundos foi simulado usando um passo de tempo variável e um número de Courant fixo de 0,5. As simulações foram conduzidas em um computador equipado com um processador Intel Core i9-12900k e 32 GB de RAM, utilizando quatro núcleos de processamento. O processo todo levou aproximadamente 4 horas para ser concluído.

## RESULTADOS

A velocidade do nitrogênio foi ajustada de modo que o tempo de residência da fase gasosa fosse igual ao de um reator contendo um leito de partículas inertes. Para esse fim, o estudo conduzido por XUE et al. (2012) foi usado como referência, e uma velocidade de 0,18 m/s foi obtida. Posteriormente, foi simulada a pirólise de uma única partícula de celulose pura. O resultado das reações para a formação de bio-óleo, biogás, biocarvão e biomassa não reagida é apresentado na Figura 3. Ela também inclui os resultados do trabalho experimental de XUE et al. (2012) e as simulações realizadas por XUE et al. (2012) e YANG et al. (2021).

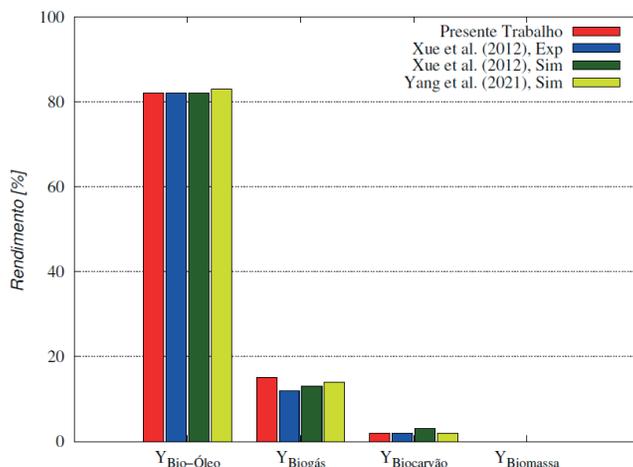


Figura 3 - Comportamento do rendimento da reação de pirólise da celulose pura.

Ao comparar os resultados obtidos da simulação com os dados relatados na literatura, observa-se que os rendimentos das reações para cada produto e para a biomassa apresentaram boa concordância. Os rendimentos de vapor de bio-óleo e de biocarvão mostraram comportamentos quase idênticos aos rendimentos experimentais. Os resultados na Tabela 4 permitem uma análise mais detalhada dos valores obtidos.

Celulose Pura				
	Simulado	XUE et al. (2012) Exp.	XUE et al. (2012) Sim	YANG et al. (2021) Sim.
$Y_{\text{bio-óleo}}$	82.50%	82.10%	82.20%	83.20%
$Y_{\text{biogás}}$	15.36%	12.40%	13.90%	14.90%
$Y_{\text{biocarvão}}$	2.14%	2.20%	3.30%	2.70%
$Y_{\text{biomassa}}$	0.00%	0.00%	0.50%	0.00%

Tabela 4 - Rendimento da reação de pirólise da celulose pura.

Pode-se observar na Tabela 4 que os rendimentos de vapor de bio-óleo, biocarvão e biomassa não reagida foram praticamente os mesmos encontrados nos experimentos conduzidos por XUE et al. (2012). O rendimento relativo do biogás apresentou uma diferença de quase 3% em relação aos dados experimentais e de 0,46% em relação ao valor relatado por YANG et al. (2021). Ao somar as frações de massa dos dados experimentais, obtém-se um valor de 96,7%, o que pode ser atribuído a erros experimentais ou imprecisões nas medições. Se tais erros ocorreram no medidor de biogás, os resultados de rendimento seriam muito próximos.

Para estudar o comportamento do modelo cinético multicomponente e multiestágio em diferentes tipos de biomassa com frações variadas de celulose, hemicelulose e lignina, foi realizada uma simulação de pirólise na biomassa de bagaço de cana-de-açúcar. Da mesma forma que para a celulose pura, a velocidade de nitrogênio foi ajustada para que o tempo de residência do gás corresponda ao tempo de residência de um reator contendo um leito de partículas inerte. Portanto, os resultados de SUTTIBAK (2017) foram utilizados para obter a velocidade média do gás dentro do reator. Assim, a condição de contorno de velocidade de entrada imposta foi ajustada para 0,21 m/s. Com base nisso, a simulação do bagaço de cana-de-açúcar foi realizada, e os resultados para os rendimentos de bio-óleo, biogás e biocarvão são mostrados na Figura 4.

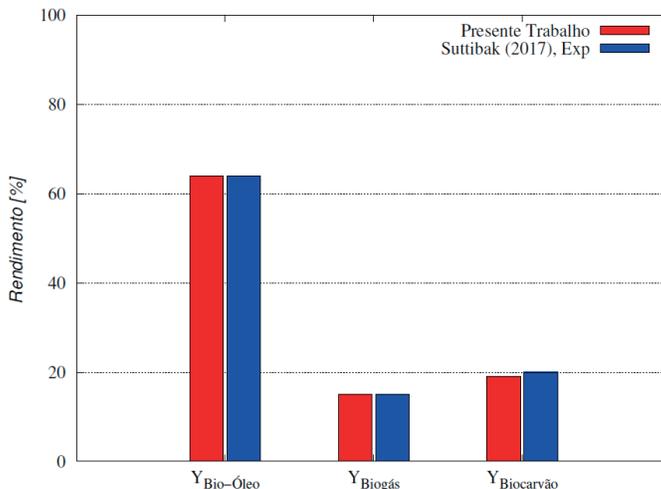


Figura 4 - Comportamento dos rendimentos da reação de pirólise da cana-de-açúcar.

Após comparar os resultados da simulação de pirólise de cana-de-açúcar com os dados existentes na literatura, torna-se evidente que os rendimentos obtidos na simulação estão em bom acordo com os dados experimentais de SUTTIBAK (2017). Para analisar as discrepâncias nos resultados de forma mais quantitativa, foi construída a Tabela 5.

Ao analisar a Tabela 5, pode-se observar que os rendimentos de bio-óleo, biogás e biocarvão estão próximos aos dados experimentais obtidos por SUTTIBAK (2017). O rendimento do vapor de bio-óleo apresentou uma diferença de 0,27% em relação aos dados experimentais, o rendimento de gás mostrou uma diferença de 0,56%, e o rendimento de carvão apresentou uma diferença de 0,83%.

	Simulado	SUTTIBAK (2017)
$Y_{\text{bio-óleo}}$	64.77%	64.50%
$Y_{\text{biogás}}$	15.86%	15.30%
$Y_{\text{biocarvão}}$	19.37%	20.20%

Tabela 5 - Rendimento da reação de pirólise da cana-de-açúcar.

## CONCLUSÃO

Com base na simulação numérica, as seguintes conclusões podem ser tiradas:

- O modelo de transferência de massa, quantidade de movimento, energia e espécie química acoplados com o modelo da fase discreta (DPM) em conjunto com a cinética multicomponente e multiestágio conseguiram representar bem o comportamento da pirólise de diferentes tipos de biomassa em um leito fluidizado. Os resultados foram confrontados e validados com dados experimentais e de literatura.

- b. O modelo proposto por este trabalho possibilitará um maior entendimento dos fenômenos envolvidos na pirólise, permitirá a realização de estudos de otimização dos parâmetros operacionais e uma avaliação e melhorias dos reatores existentes.

## REFERÊNCIAS

- Almeida, M. B. B. d. (2008). Bio-óleo a partir da pirólise rápida, térmica ou catalítica, da palha da cana-de-açúcar e seu co-processamento com gas/óleo em craqueamento catalítico. **Disertação de Mestrado**, UFRJ.
- BASHIR, M.; YU, X.; HASSAN, M.; MAKKAWI, Y. Modeling and performance analysis of biomass fast pyrolysis in a solar-thermal reactor. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 5, p. 3795–3807, 2017.
- BATISTA JUNIOR, R. Pirólise da borra de café: Cinética química e operação em leito fixo. **Dissertação de Mestrado**, UFTM, 2017.
- BENEVIDES, L. C. Pirólise de secagem de laranja: Análise cinética dos estágios de secagem e devolatização. **Dissertação de Mestrado**, UFES, 2015.
- BOYCE, C.; HOLLAND, D.; DENNIS, J.; SCOTT, S. Limitations on fluid grid sizing for using volume-averaged fluid equation in discrete element models of fluidized beds. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 54, p. 10684-10697, 2015.
- BRIDGWATER, A. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and Bioenergy**, v. 38, p. 68–94, 2012.
- BROWNSORT, P. Biomass Pyrolysis Processes: Performance parameters and their influence on Biochar system boundaries. **Tese de Doutorado**, Biochar Research Center, 2009.
- CLISSOLD, J.; JALALIFAR, S.; SALEHI, F.; ABBASSI, R.; GHODRAT, M. Fluidisation characteristics and inter-phase heat transfer on product yields in bubbling fluidised bed reactor. **Fuel**, v. 273, p. 117791, 2020.
- CURTIS L. J.; MILLER, D. J. Transport model with radiative heat transfer for rapid cellulose pyrolysis. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 27, p. 1775–1783, 1988
- DI BLASI, C. Numerical simulation of cellulose pyrolysis. **Biomass and Bioenergy**, v. 7, p. 87–98, 1994.
- ERGUN S.; ORNING, A. A. Fluid flow through randomly packed columns and fluidized beds. **Industrial & Engineering Chemistry**, v. 41, p. 1179–1184, 1949.
- FERREIRA, A. D.; FERREIRA, S. D.; DE FARIAS NETO, S. R. Study of the influence of operational parameters on biomass conversion in a pyrolysis reactor via cfd. **Korean Journal of Chemical Engineering**, v. 40, p. 2787–2799, 2023.

FOONG, S. Y.; LIEW, R. K.; YANG, Y.; CHENG, Y. W.; YEK, P. N. Y.; WAN MAHARI, W. A.; LEE, X. Y.; HAN, C. S.; VO, D. V. N.; VAN LE, Q.; AGHBASHLO, M.; TABATABAEI, M.; SONNE, C.; PENG, W.; LAM, S. S. Valorization of biomass waste to engineered activated biochar by microwave pyrolysis: Progress, challenges, and future directions. **Chemical Engineering Journal**, v. 389, p. 124401, 2020.

HU, C.; LUO, K.; WANG, S.; SUN, L.; FAN, J. Computational Fluid Dynamics/Discrete Element Method Investigation on the Biomass Fast Pyrolysis: The Influences of Shrinkage Patterns and Operating Parameters. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 58, p. 1404–1416, 2019.

KOUFOPANOS, C. A.; LUCCHESI, A.; MASCHIO, G. Kinetic modelling of the pyrolysis of biomass and biomass components. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 67, p. 75–84, 1989.

KOUFOPANOS, C. A.; PAPAYANNAKOS, N.; MASCHIO, G.; LUCCHESI, A. Modelling of the pyrolysis of biomass particles. Studies on kinetics, thermal and heat transfer effects. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 69, p. 907–915, 1991.

LI, T.; GOPALAKRISHNAN, P.; GARG, R.; SHAHNAME, M. CFD–DEM study of effect of bed thickness for bubbling fluidized beds. **Particuology**, v. 10, p. 532–541, 2012.

MADUSKAR, S.; FACAS, G. G.; PAPAGEORGIOU, C.; WILLIAMS, C. L.; DAUENHAUER, P. J. Five rules for measuring biomass pyrolysis rates: pulse-heated analysis of solid reaction kinetics of lignocellulosic biomass. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 6, p. 1387–1399, 2018.

MILLER R.; BELLAN, J. A generalized biomass pyrolysis model based on superimposed cellulose, hemicellulose and lignin kinetics. **Combustion Science and Technology**, v. 126, p. 97–137, 1997.

MIRANDA, T. N.; MOTTA, L. I.; MACIEL FILHO, R.; MACIEL, W. M. R. Sugarcane bagasse pyrolysis: A review of operating conditions and products properties. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 149, p. 111394, 2021.

PAPADIKIS, K.; GERHAUSER, H.; BRIDGWATER, A.; GU, S. Cfd modelling of the fast pyrolysis of an in-flight cellulosic particle subjected to convective heat transfer. **Biomass and Bioenergy**, v. 3, p. 97–107, 2009<sup>a</sup>.

PAPADIKIS, K.; GU, S.; BRIDGWATER, A. Cfd modelling of the fast pyrolysis of biomass in fluidised bed reactors: Modelling the impact of biomass shrinkage. **Chemical Engineering Journal**, v. 149, p. 417–427, 2009<sup>b</sup>.

PARK, H. C.; CHOI, H. S. Fast pyrolysis of biomass in a spouted bed reactor: Hydrodynamics, heat transfer and chemical reaction. **Renewable Energy**, v. 143, p. 1268–1284, 2019.

SUTTIBAK, S. Influence of reaction temperature on yields of bio-oil from fast pyrolysis of sugarcane residues. **Engineering and Applied Science Research**, v. 44, p. 142–147, 2017.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. An introduction to computational fluid dynamics. **Harlow: Pearson Prentice Hall**, 2007.

WARD S.; BRASLAW, J. Experimental weight loss kinetics of wood pyrolysis under vacuum. **Combustion and Flame**, v. 61, p. 261–269, 1985.

XIONG, Q.; ARAMIDEH, S.; KONG, S.C. Assessment of devolatilization schemes in predicting product yields of biomass fast pyrolysis. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 33, p. 756–761, 2014.

XUE, Q.; DALLUGE, D.; HEINDEL, T.; FOX, R.; BROWN, R. Experimental validation and cfd modeling study of biomass fast pyrolysis in fluidized bed reactors. **Fuel**, v. 97, p. 757–769, 2012.

YANG, S.; WAN, Z.; WANG, S.; WANG, H. Reactive mp-pic investigation of heat and mass transfer behaviors during the biomass pyrolysis in a fluidized bed reactor. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, p. 105047, 2021.

YANG, S.; DONG, R.; DU, Y.; WANG, S.; WANG, H. Numerical study of the biomass pyrolysis process in a spouted bed reactor through computational fluid dynamics. **Energy**, v. 214, p. 118839, 2021.

# MODELING, SIMULATION AND CONTROL OF SHELL AND TUBE HEAT EXCHANGER OF BRAZILIAN PRE-SAL FPSO

*Data de aceite: 01/07/2024*

**José Andersands Flauzino Chaves**

Universidade Federal de Sergipe

**Gabriel Francisco da Silva**

Universidade Federal de Sergipe

**Rosivânia da Paixão Silva Oliveira**

Universidade Federal de Sergipe

**RESUMO:** A produção offshore brasileira é maior que a onshore e por isso merece destaque na sua análise. Nos últimos anos a exploração offshore de petróleo no pré-sal brasileiro ganhou destaque pelo volume e contribuição social para o país. Por ter um processo complexo se torna importante simular e modelar as condições impostas aos equipamentos com maior precisão possível. Os trocadores dos FPSOs dos processos das plataformas são em sua maioria do tipo casco e tubo e por isso merecem atenção. Foi nesse cenário que foi desenvolvido modelos e simulações para controle de trocadores de calor do tipo casco e tubo a fim de avaliar condições de otimização e cenários possíveis de estabilidade do processo. Foi utilizado como base o esquema proposto pelo trabalho do Garcia e simulado em ambiente Simulink®

do Matlab® a fim de validar os modelos com dados reais da plataforma estudada. Os resultados foram satisfatórios, com desvios menores do que 10% para as variáveis analisadas e foi possível validar o modelo do Gracia com o comparativo com os dados teóricos e reais disponíveis.

**PALAVRAS-CHAVE:** Trocador de calor casco e tubo, controle de processo, simulação e modelagem.

## INTRODUÇÃO

A indústria do petróleo é essencial para a vida moderna. Seja para geração de energia elétrica, movimentação de veículos ou até mesmo como insumo para fabricação de diversos componentes, podendo até o consumo de petróleo ser usado para a medição do desenvolvimento de uma nação e, por isso, continuará a ser essencial por muitas décadas até que se achem produtos substitutos economicamente viáveis para todas as suas aplicações, (COSTA, 2014).

Os desafios tecnológicos para exploração de petróleo em águas ultra profundas, pré-sal brasileiro, perpassam

as técnicas convencionais de exploração e produção, Chaves (2018). Segundo Campos et al. (2017), ambientes que apresentam situações extremas de temperatura, pressão e presença de contaminantes, como o CO<sub>2</sub>, requerem novas abordagens para viabilizar a produção com as eficiências de referência para os processos, assim justificando os estudos nos equipamentos utilizados para processamento desse petróleo.

Os trocadores de calor são importantes nas plataformas de petróleo, pois fornecem a variação de temperatura adequada ao funcionamento dos processos. Garcia (2017) propõem uma nova forma de realizar simulação e controle de trocadores de calor casco e tubos que se torna importante para a comunidade científica, porque rompe com os modelos convencionais a parâmetros concentrados e apresenta uma forma de discretizar o modelo de sistemas de equações diferenciais de calor em estágios de simulação, assim viabilizando a simulação em Simulink® do Matlab® e assim sendo possível avaliar o controle de processo para trocadores de calor em vários cenários, Chaves (2021).

Assim, essa pesquisa terá como objetivo analisar como o modelo proposto por Garcia (2017) se aplica para o controle de dois trocadores de calor casco e tubos de uma plataforma do tipo FPSO real hoje instalada no pré-sal Brasileiro, tendo como foco avaliar a estabilidade do controle e a validação do modelo a fim de que se possa fazer avaliação de cenários que agreguem valor para a Petrobras, contribuindo para uma operação da plataforma de forma mais estável e com desenvolvimento industrial sustentável, com ambiente de trabalho seguro e respondendo a seguinte pergunta de pesquisa:

“Como modelar, simular e controlar trocadores de calor do processo de tratamento de uma plataforma do tipo FPSO, com a proposta de Garcia (2017), de forma válida e segura?”.

## **METODOLOGIA**

O fluxograma de processo usado nesse trabalho leva em conta a condição atual da plataforma em análise. Abaixo na figura 1 segue fluxograma resumido feito para esse trabalho de acordo com a situação atual da plataforma. Os trocadores estudados são os P-1223001 e P-1223002, dotados de controladores PID e com apenas 1 passe nos tubos e 1 passe no casco para o momento atual de operação, com capacidade de operar com até 160.000 bbl/d.

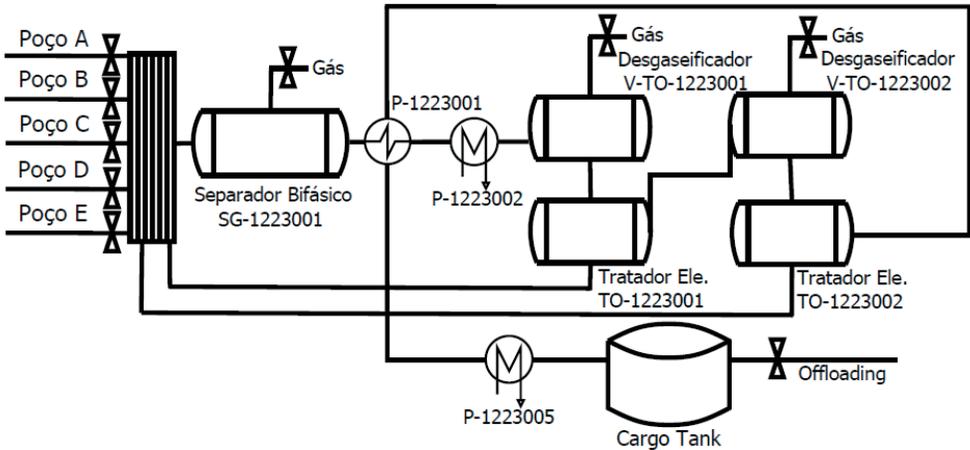


Figura 1 – Fluxograma de processo de tratamento de óleo na configuração atual.

Fonte: Dados do autor (2023).

Para modelar o sistema de transferência de calor foi feito o equacionamento seguinte, com base no que é descrito na obra de Garcia (2017) e já aplicando a nomenclatura para o caso em análise, seguido da figura 2 que mostra como ele é esquematizado:

$$\frac{d(T_{T,média})}{dt} = \frac{\rho_{T,e} Q_{T,e} c_{P,T} (T_{T,e} - T_{T,s}) + UA \Delta T_{CT}}{\rho_T V_T c_{P,T}} \quad (1)$$

$$\frac{d(T_{C,média})}{dt} = \frac{\rho_{C,e} Q_{C,e} c_{P,C} (T_{C,e} - T_{C,s}) - UA \Delta T_{CT}}{\rho_C V_C c_{P,C}} \quad (2)$$

$$\Delta T_{CT} = \frac{\Delta T_{Casco \text{ em cada seção}}}{2} - \frac{\Delta T_{tubos \text{ em cada seção}}}{2} \quad (3)$$

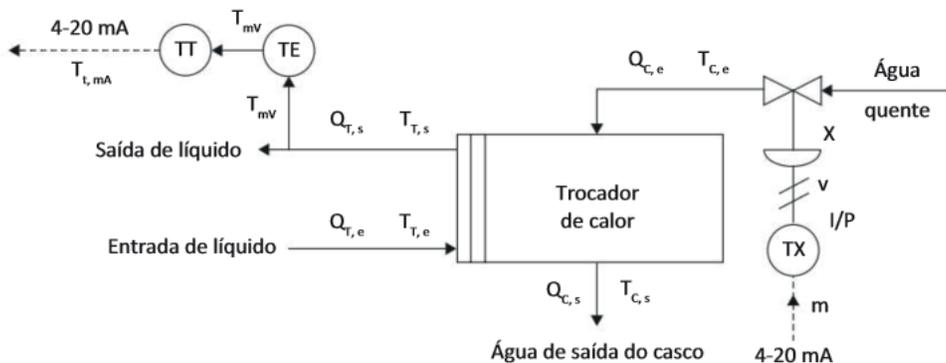


Figura 2 – Esquema de um trocador de calor casco e tubos.

Fonte: Garcia (2017).

$TT,média$  = Temperatura média nos tubos ( $^{\circ}C$ ) e  $TC,média$  = Temperatura média no casco ( $^{\circ}C$ );

$cP,T$  = Calor específico do fluido nos tubos ( $J/(kg.K)$ );

$cP,C$  = Calor específico do fluido no casco ( $J/(kg.K)$ );

$TT,e$  e  $TT,s$  = Temperatura de entrada e saída dos tubos em cada seção ( $^{\circ}C$ );

$TC,e$  e  $TC,s$  = Temperatura de entrada e saída do casco em cada seção ( $^{\circ}C$ );

$QT,e$  = Vazão do fluido nos tubos ( $m^3/s$ ) e  $QC,e$  = Vazão do fluido no casco ( $m^3/s$ );

$UA$  = Coeficiente global de troca térmica ( $W/K$ );

$VT$  e  $VC$  = Volume dos tubos e volume do casco.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O circuito que representa as equações apresentadas na metodologia, em simulink®, para cada seção pode ser visto abaixo:

Após implantado o equacionamento da transferência de calor no Simulink® é a vez de ser implementado os elementos necessários ao fechamento das malhas de controle, como é o caso dos medidores, os controladores, os atuadores e os conversores. Além disso, foram incluídos os elementos de medição dos fatores de desempenho dos controladores, onde, no caso, foram os IAE, ISE, ITAE, ITSE e CE. Segue abaixo esquema criado para realizar o controle de temperatura dos trocadores desse trabalho em ambiente Simulink®. Vale salientar que os controles de nível e pressão dos vasos separadores e tratadores desse trabalho também foram tratados como abaixo, porém, considerando as peculiaridades de cada tipo de controle e as condições impostas pelos equipamentos. Veja figura 4 abaixo.

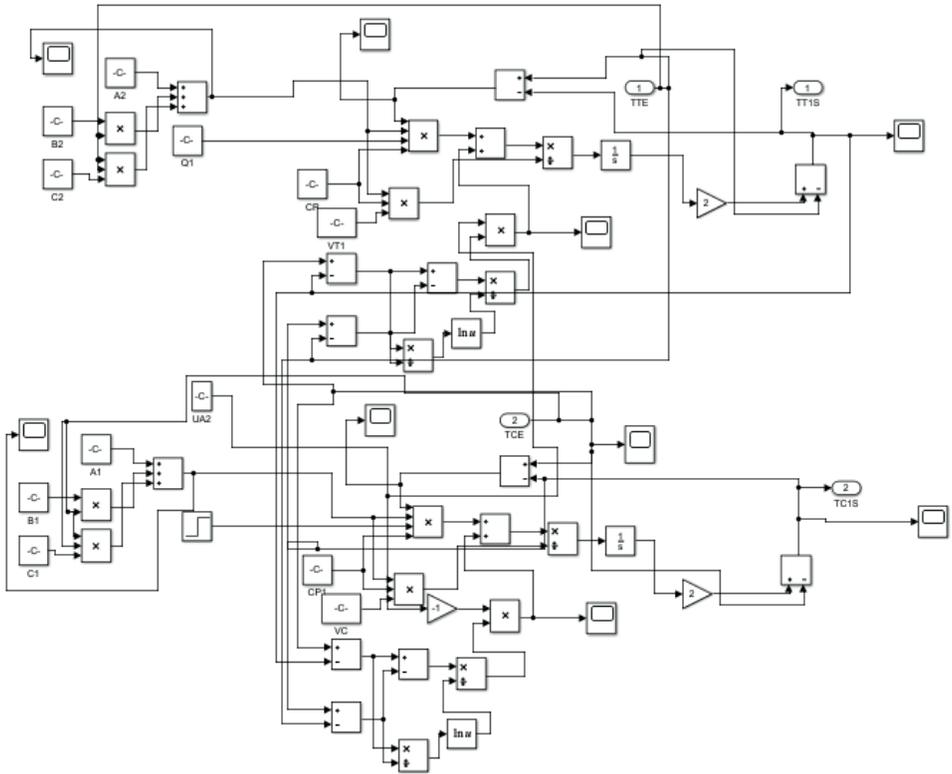


Figura 3 – Esquema elaborado pelo autor – segunda seção.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

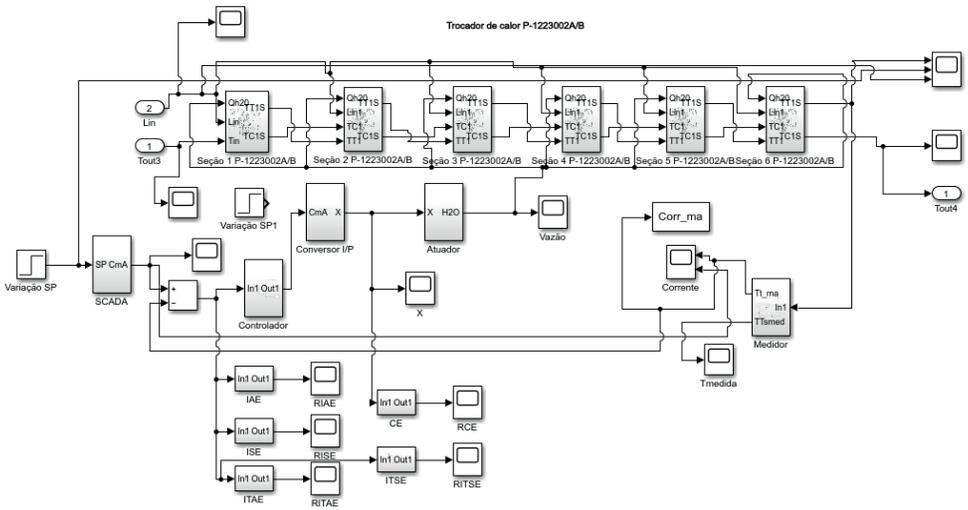


Figura 4 – Trocador de calor casco e tubo utilizado na simulação já com controlador.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Nesse caso, foi utilizado um controlador do tipo PID de acordo com o recomendado por Teixeira *et al.* (2015). Diferente do controle de interface e pressão, o medidor de temperatura tem dinâmica considerável no processo de controle e, por isso, foi considerado no dimensionamento do controle, sendo modelado por uma curva de primeira ordem com atraso e tempo morto, mas com data hold de ordem 0 para simplificar a análise ao invés do de ordem 1 como requerido para processos que tem o termo derivativo, pois, nesse caso, teve valor absoluto pequeno, onde o restante dos itens foram considerados puramente proporcionais e os atuadores com dinâmica de primeira ordem com atraso e tempo morto com data hold de ordem 0.

Ainda a fim de validar o modelo do trocador de calor casco e tubo proposto por Garcia (2017) e replicado aqui nas condições de processo, foi montada uma simulação para validar o modelo com os dados presentes no exemplo encontrado em Garcia (2017, p. 535). O diagrama elaborado no Simulink® se encontra na figura 5, onde existe o mesmo trocador repetido duas vezes, sendo aplicada uma perturbação positiva em um e uma negativa no outro a fim de expor no mesmo gráfico e tempo os valores de resposta ao degrau aplicado, podendo ser visto o resultado disso na figura 7 a fim de fazer comparativo entre os resultados mostrados na figura 6, retirada do livro Garcia (2017, p. 535).

Percebe-se que os trocadores se encontram em malha aberta e a perturbação segue o que foi indicado no livro em relação a um degrau de 0,48 mA na saída do controlador e, com isso, avaliando a resposta do medidor e saída do trocador a essa perturbação, podendo ser visto no mesmo gráfico tanto a perturbação positiva quando a negativa.

Na figura 8 pode-se ver o resultado de um ensaio em malha aberta com perturbação do tipo degrau igual ao incremento de 0,48 mA na saída do controlador a fim de avaliar no medidor de temperatura a sua deformação ao degrau e, com isso, fazer a análise do comportamento do processo, mostrando a validade do controle e modelos implementados com estabilidade e efetividade.

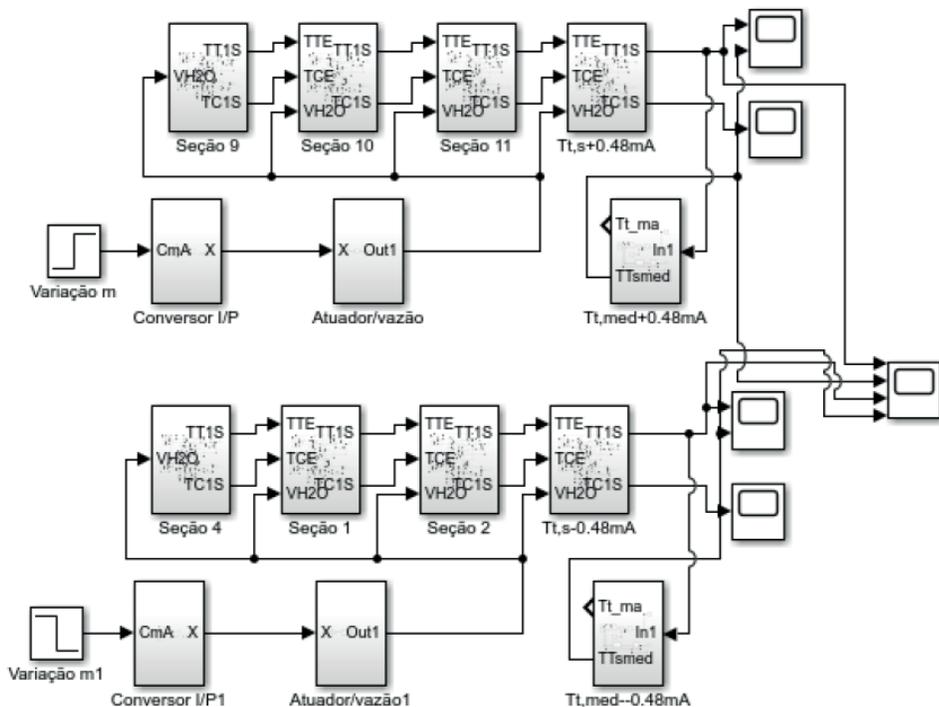


Figura 5 – Esquema da simulação para validação do modelo do trocador.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

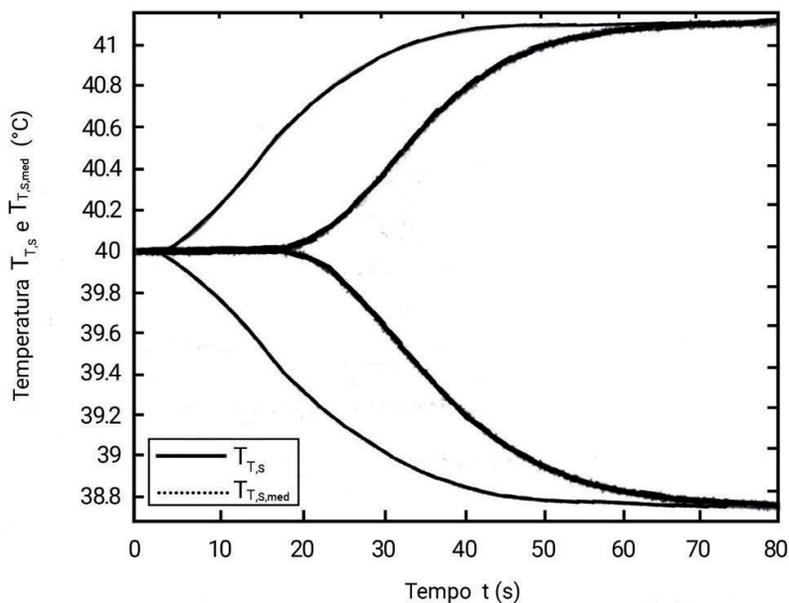
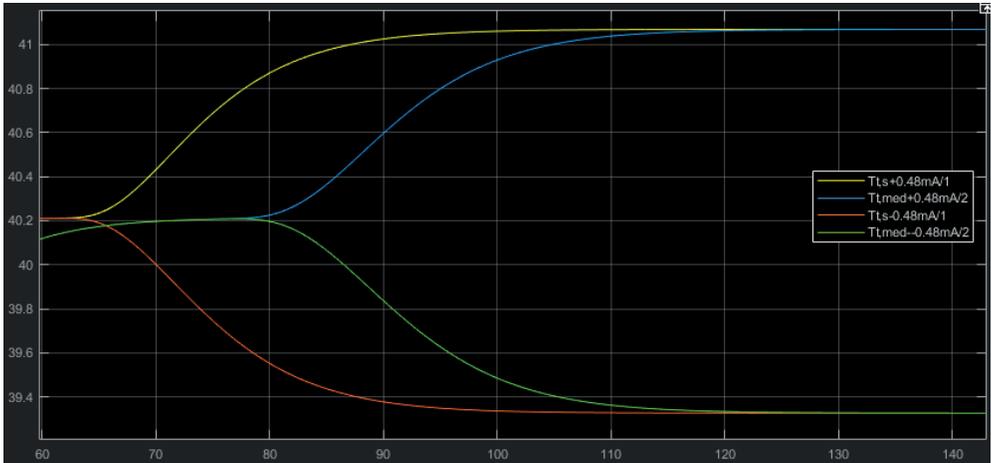


Figura 6 – Gráfico de temperatura exportada no livro ao degrau de 0,48mA na corrente de saída do controlador.

Fonte: Garcia, 2017.



Temperatura(°C) x Tempo (s)

Figura 7 – Temperatura exportada no simulador ao degrau de 0,48mA na corrente de saída do controlador.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

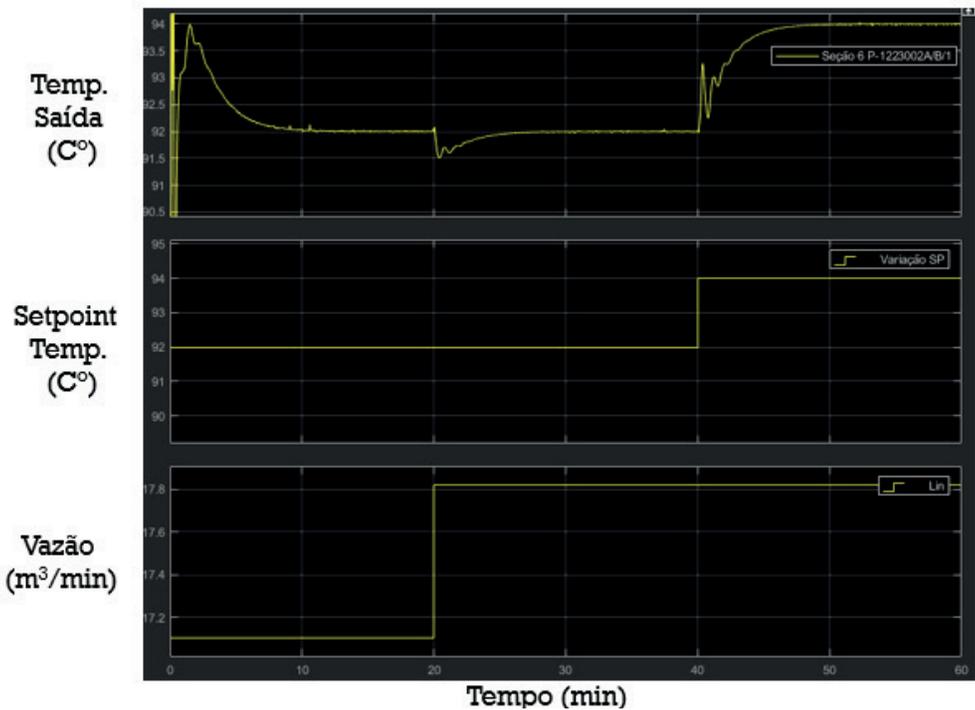


Figura 8 – Gráfico de avaliação do controle de temperatura no P-1223002.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

## CONCLUSÕES

Pode-se notar a boa correlação entre as figuras 6 e 7 em relação a abertura das respostas, tempo morto e aos atrasos de tempo. As pequenas diferenças encontradas entre o valor de partida e o valor final mostrado ocorrem pela variação na metodologia de cálculo de densidade, onde o Garcia usa uma matriz para o seu cálculo e, na metodologia aqui empregada, foi usada uma correlação com base em Racket e Lu. Vale salientar que os tempos iniciais entre os gráficos são diferentes porque existe um tempo necessário a estabilização do cálculo de temperatura na simulação realizada pelo autor, dado o método numérico utilizado pelo Simlunk®, e a capacidade de processamento do microprocessador do equipamento utilizado para simulação, enquanto no gráfico do Garcia (2017), o processo já está estabilizado no tempo zero e, por isso, não precisa aguardar tempo de estabilização. No Garcia, os degraus são aplicados no tempo 0 e, nessa simulação, 4 são aplicados em 60 segundos de simulação.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio e patrocínio da Universidade Federal de Sergipe, UFS, RENORBIO, PETROBRAS e FAPITEC-SE.

## REFERÊNCIAS

- CHAVES, J. A. F. **Ferramentas de gestão estratégica para aplicação de Normas Regulamentadoras do trabalho na indústria do petróleo e gás Onshore**. 2018. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Administração) Universidade Federal de Sergipe, Aracaju, Brasil, 2018.
- CHAVES, José Andersands Flauzino; DA SILVA, Flávio Vasconcelos; FONSECA, Rodolpho Rodrigues. **Modelagem e simulação dinâmica do processo de tratamento de óleo em um FPSO**. Apresentação de trabalho. III SEMINÁRIO DE PESQUISA EM ENGENHARIA QUÍMICA. Universidade de Federal de Sergipe. 2021.
- CAMPOS, M. C. M. M. *et al.* Intelligent system for start-up and anti-slug control of a petroleum *offshore* platform. *In: OTC Brasil*. OnePetro, 2017.
- COSTA, S. M. **A exploração do pré-sal e o futuro brasileiro**. 2014. 38 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Ciências Contábeis) Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2014.
- GARCIA, C. Controle de processos industriais: **estratégias convencionais**. Editora Blucher, 2017.
- SHUKLA, A.; KARKI, H. **Application of robotics in offshore oil and gas industry—A review Part II**. *Robotics and Autonomous Systems*, v. 75, p. 508-524, 2016.
- TEIXEIRA, H. C. G. *et al.* **Controles típicos de equipamentos e processos industriais**. Editora Blucher, 2015.

# MULHERES NO ÂMBITO NUCLEAR IMPULSIONANDO A INTEGRAÇÃO LATINO- AMERICANA

*Data de aceite: 01/07/2024*

### **Nélida Lucia del Mastro**

Centro de Tecnologia das Radiações,  
Instituto de Pesquisas Energéticas e  
Nucleares IPEN-CNEN/SP – Universidad  
de São Paulo-IPEN/USP, Brasil  
lattes.cnpq.br/8541245790089233  
<https://orcid.org/0000-0001-7937-0079>

### **Juana Luisa Gervasoni**

Centro Atômico Bariloche, Comissão  
Nacional de Energia Atômica (CNEA),  
Argentina. Instituto Balseiro (Univ. Nac. de  
Cuyo- CNEA)  
<https://orcid.org/0000-0002-5472-8879>

**RESUMO:** A energia nuclear é utilizada para a geração de energia elétrica, a produção de radioisótopos, a dessalinização de água do mar e para a produção de hidrogênio. As técnicas nucleares e isotópicas contribuem para a preservação dos recursos hídricos e do solo e para controlar as pragas, garantir a inocuidade dos alimentos e maior segurança alimentar, bem como melhorar a produção e sanidade pecuárias. A organização de mulheres no âmbito nuclear (*Women in nuclear-WiN*) tem como uma das suas funções dar a conhecer ao público os benefícios que a aplicação da energia

nuclear pode trazer em todas as possíveis aplicações. Essa ação vai contribuir para superar restrições de aquela parte do público que é reticente sobre o uso dessa tecnologia e contribuir à integração latino-americana. Também, são apresentados cruzamentos de dados do número de publicações relacionadas, que ajudam analisar objetivamente a tendência de essa integração.

**PALAVRAS-CHAVE:** WiN, energia nuclear, mulheres, integração latino-americana

### WOMEN IN THE NUCLEAR FIELD PROMOTING LATIN AMERICAN INTEGRATION

**ABSTRACT:** Nuclear energy is used for electricity generation, radioisotopes production, desalination of sea water and for hydrogen production. Nuclear and isotopic techniques contribute for hydric resources and soil preservation, insect plagues control, to warrant food innocuity and better food security, and to increase livestock sanity and production. The organization Women in Nuclear (WiN) has as one of its objectives make the public known about the benefits that nuclear energy can bring in all of their possible

applications. That action will help to overcome concerns of part of the public reticent about the employment of this technology and to contribute to Latin American integration. Also, crossings of data on numbers of related publications on the subject are presented that help to analyze objectively the trend of such integration.

**KEYWORDS:** WiN, nuclear energy, women, Latin American integration.

## INTRODUÇÃO

Entre os desafios que a humanidade enfrenta atualmente está o problema de reduzir drasticamente o consumo de combustíveis fósseis (Kainuma *et al.*, 2013) e aumentar proporcionalmente a utilização de energias limpas, como a eólica, solar e nuclear (SADEKIN *et al.*, 2019) que não emitem gases de efeito estufa: dióxido de carbono, óxido nitroso e metano (FRANCHINI *et al.*, 2017). A energia nuclear, pela sua densidade energética, possui potencial gerador superior a outras fontes, como as hidrelétricas, e independência em relação aos ciclos naturais (LIESNER DE SOUZA & CARNEIRO LIMA, 2019). Também, é preciso considerar conjuntamente os principais problemas do nosso tempo: geração de energia, alimentação, saúde, preservação ambiental e o controle de armamentos. Sendo a única organização verdadeiramente universal no mundo, a Organização das Nações Unidas (ONU) tornou-se o principal fórum para abordar questões que transcendem as fronteiras nacionais e não podem ser resolvidas por qualquer país agindo sozinho. Em 1957 foi fundada a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) organização especializada em energia nuclear, mas que também pode dar contributos importantes noutras áreas. A energia nuclear é competitiva e sustentável. Um aspecto raramente mencionado: de todas as formas limpas de geração de energia elétrica, a instalação de uma usina nuclear ocupa uma área mínima se comparada aos extensos campos de moinhos de vento ou instalações de painéis fotovoltaicos, que causam grande prejuízo à flora e fauna locais.

A América Latina é o encontro do território colonizado pelos europeus portugueses e espanhóis, inicialmente habitado pelos índios, ou seja, produto de uma síntese que foi feita em detrimento do elemento indígena (CHAUNU, 1979), formado no decorrer dos últimos séculos sobre o domínio imperial e colonial. “América Latina” é frequentemente utilizada como sinónimo de Ibero-América, excluindo os territórios de língua holandesa, francesa e inglesa (RAE, 2005). Assim, “América Latina” poderia ser definida como aquela parte das Américas que outrora fez parte dos impérios espanhol, português e francês (TORRES (2013).

A seguir serão analisados: 1. os eventos históricos sobre a energia nuclear, 2. a situação da energia nuclear na América Latina, 3. o papel das mulheres cientistas na América Latina, 4. a participação das mulheres na área nuclear, 5. o contexto sócio-histórico no qual surge “WiN Global”, 6. o processo de criação de WiN ARCAL, 7. a opinião pública sobre energia nuclear e finalmente, 8. alguns dados sobre a integração latino-americana.

## ENERGIA NUCLEAR: EVENTOS HISTÓRICOS

A importância de energia nuclear reside em que não liberta gases de efeito de estufa quando utilizada para a geração de energia elétrica, mas também pode ser utilizada para a produção de radioisótopos, dessalinização da água do mar e produção de hidrogénio. As técnicas nucleares e isotópicas contribuem para preservar os recursos hídricos e do solo, reduzir ou eliminar a carga bacteriana de produtos para a área médica e alimentos e controlar pragas, garantindo a segurança alimentar, melhorando a produção e a saúde pecuária e melhorando as propriedades de vários materiais.

Chmielewski (2023) resume muito bem conceitos relacionados à aplicação da energia nuclear em seu artigo intitulado: “Tecnologias de Radiação: O futuro está aqui”.

Os eventos históricos de usos da energia nuclear começam com as primeiras experiências com radioatividade realizadas no século XIX por Wilhelm Röntgen, Antoine Henri Becquerel, Marie e Pierre Curie, entre outros. Os resultados das pesquisas das décadas seguintes foram utilizados, sobretudo, para fins militares (WNA, 2010).

Em 1951, cientistas americanos conseguiram, pela primeira vez, produzir eletricidade através da fissão nuclear e, três anos depois, a Rússia inaugurou o primeiro reator de grande capacidade. Nas décadas de 1960 e 1970, a energia nuclear estava em plena expansão e muitas usinas nucleares foram construídas em todo o mundo. A popularidade desta tecnologia como uma alternativa limpa e barata aos combustíveis fósseis intensificou-se com a primeira crise do petróleo, em 1973 e paralelamente, surgiram opiniões críticas que alertavam para os riscos de acidentes e resíduos radioativos (KRESS, 2011). Apesar de tudo, a tecnologia nuclear continua a ser uma importante fonte de energia.

Existem dois tipos de reatores nucleares: de potência e de pesquisa. No primeiro, existe material nuclear para gerar grandes quantidades de energia e poder fornecer eletricidade a uma cidade. Neste último, as propriedades da radiação que ocorre nas reações nucleares são utilizadas para pesquisa e produção de radioisótopos.

Segundo a AIEA, 29 países utilizam 449 reatores que produziram 14% da eletricidade mundial. A participação da energia nuclear na produção de eletricidade de alguns países varia entre 2% na China e mais de 70% em França. Existem inúmeras usinas nucleares em operação, em construção e ainda mais, planejadas para as próximas décadas. Além disso, 250 reatores de teste são operados em 56 países, e 180 reatores abastecem cerca de 140 navios e submarinos (WNA, 2011; AIEA, 2018).

## ENERGIA NUCLEAR: SITUAÇÃO NA AMÉRICA LATINA

As aplicações pacíficas da energia nuclear na América Latina não são uma atividade nova. Argentina, Brasil e México são os países da América Latina que já possuem reatores nucleares de potência, ou seja, são utilizados para gerar energia elétrica. Outros países da região possuem apenas reatores de pesquisa. Países como o Chile ou a Venezuela aspiram – ou aspiraram durante algum tempo – a adquirir centrais nucleares. Cuba começou, em 1983, a construir uma central nuclear com a ajuda da então União Soviética, mas teve que abandoná-la devido a problemas financeiros em 1992. Várias tentativas de reabertura do programa com a ajuda de diferentes cooperadores externos, incluindo a AIEA, falharam (ARGÜELLO, 2009). Contudo, na América Latina e no Caribe existem 23 reatores nucleares para fins de pesquisa (4 no Brasil), dos quais 18 estão operacionais. Eles também são encontrados na Argentina, Chile, Colômbia, Jamaica, Peru, Uruguai e Venezuela, e são utilizados para aplicações de energia nuclear na agricultura, indústria, mineração e medicina (ÁLVAREZ VALDÉS, 2008). Em todos os casos, porém, o uso de técnicas nucleares é amplo e difundido na medicina nuclear (diagnóstico e terapia através do uso de radioisótopos e radiações), na indústria, na preservação do meio ambiente, bem como em todas as aplicações possíveis para o benefício dos seres humanos.

Na Argentina, a instituição que conduz a política nuclear desde a sua criação em 1950 é a Comissão Nacional de Energia Atômica (<https://www.cnea.gob.ar/es/wp-content/uploads/2016/09/Decreto-10936-50.pdf>). O Brasil, por sua vez, promulgou a lei que cria a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) em 1962 ([http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/L4118.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L4118.htm)). No México, o Instituto Nacional de Pesquisa Nuclear (ININ), uma instituição do estado mexicano, foi fundado em 1956 sob o nome de Comissão Nacional de Energia Nuclear ([https://www.inin.gob.mx/\\_acercade/historia.cfm](https://www.inin.gob.mx/_acercade/historia.cfm)).

Argentina possui atualmente três reatores nucleares de potência, o primeiro colocado em operação em 1974. É a Usina Nuclear Atucha I, localizada a noroeste de Buenos Aires. O segundo está na região de Córdoba, denominado El Embalse e colocado em operação em 1984; e finalmente Atucha II, que também está localizado a noroeste da capital argentina e foi comissionado em 2014. Os três reatores, que utilizam água pesada em alta pressão como moderador de nêutrons, geram cerca de 6,2% da energia fornecida ao país (<https://latinamericanpost.com/es/29112-america-latina-tambien-tiene-reactores-nucleares>). O Brasil foi o segundo país a ativar seus reatores nucleares de potência. Foram eles o Angra I, ativado em 1982, e o segundo Angra II, em 2000. Um terceiro reator está em construção e também ficará localizado em Angra-dos-Reis, no Rio de Janeiro. As duas centrais ativas geram cerca de 3% da energia do país e as centrais ativas têm uma capacidade elétrica de 1.990 megawatts (MW), a nova central terá mais 1.405 MW.

O México possui atualmente uma usina nuclear, em Laguna Verde, que conta com dois geradores, que foram inaugurados em 1989 e 1994 e estão localizados no estado de

Veracruz. Até 2018 e segundo o Nuklear Forum produz cerca de 5% da energia total e tem capacidade de 1.552 MW.

Para promover a pesquisa na América Latina, foi adotado em Viena em 1998 (assinado pelo Brasil em 4 de agosto de 1999, decreto nº 5.885 de 05 de setembro de 2006) o Acordo de Cooperação Regional para a Promoção da Ciência e Tecnologia Nuclear na América Latina e no Caribe (ARCAL), que no seu início contava com 12 estados membros e tem numerosos projetos em execução até hoje.

## **PAPEL DAS MULHERES CIENTISTAS NA AMÉRICA LATINA**

Em termos do papel das mulheres cientistas na região latino-americana e de acordo com a Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO), órgão adjunto da ONU, a América Latina excede a média mundial de mulheres pesquisadoras/investigadoras (<https://www.aa.com.tr/es/pol%C3%ADtica/unesco-am%C3%A9rica-latina-supera-la-media-mundial-de-mujeres-investigadoras/1731331>). Na região, 45% dos pesquisadores são mulheres, um número que excede em muito a taxa global de 28%. Entretanto, em todo o mundo, apenas 35% dos estudantes matriculados em carreiras ligadas à ciência, tecnologia, engenharia e matemática são mulheres. Hoje, um número crescente de mulheres está a tomar consciência da beleza da ciência e da tecnologia e do seu potencial para melhorar o bem-estar das nossas sociedades.

## **PARTICIPAÇÃO DAS MULHERES NA ÁREA NUCLEAR**

O trabalho realizado pelas mulheres na área nuclear caracteriza-se dentro de atividades de ciência, tecnologia e inovação, correspondendo a diversas categorias de acordo com o tipo de atividade, mas ainda há um baixo número de mulheres nessa área. Como ilustração dessa evidência, mencionaremos dados institucionais da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) do Brasil de 2020, que provavelmente são semelhantes aos de outros países latino-americanos com desenvolvimento semelhante em atividades nucleares, como Argentina ou México. Do total de trabalhadores da CNEN (1.664), 13% eram cientistas, 30% tecnólogos, 11% analistas, 23% técnicos, 21% auxiliares; realizando todas essas atividades, 29% dos trabalhadores eram mulheres. O 50% delas possuem diploma universitário, em comparação com 31% dos homens. Mas quando observamos a distribuição dos cargos de poder, vemos que existem as seguintes discrepâncias na relação homem/mulher: diretores 7/1, coordenadores gerais 7/3, chefes de divisão 21/12 e chefes de serviço 69/19.

Também, o objetivo do trabalho de Santos *et al.* (2022) foi avaliar a participação feminina em um instituto de pesquisa nuclear (instituição vinculada ao estado de São Paulo e ao governo federal brasileiro). As autoras verificaram como estão distribuídas as mulheres

que trabalham nessa unidade, qual a sua área de atuação e posição nos níveis de carreira. A pesquisa foi realizada por meio de um formulário online, respondido voluntariamente, que continha perguntas para traçar o perfil dessas mulheres. O resultado mostrou que o perfil majoritário é de mulheres brancas, pós-graduandos com até 41 anos, naturais da região Sudeste, predominantemente paulistas, que são/foram orientadas por homens, que não conhecem a associação *Women in Nuclear*. Pesquisas como esse levantamento e divulgação de eventos sobre mulheres é algo que precisa ser feito com mais frequência para enfatizar a importância da presença feminina nas ciências.

As mulheres na área nuclear ingressam no mercado de trabalho após uma seleção rigorosa e muitas vezes por concurso público. Assim, em princípio não sofrem discriminação, embora tenham menor representatividade em cargos de gestão e liderança como mencionado acima. Essa disparidade de gênero foi verificada em relação à Matemática, Computação e Ciências Naturais com uma abordagem da América Latina (MONTEZ & DAWSON, 2019) e em particular das mulheres argentinas que trabalham na Comissão Nacional de Energia Atômica (GERVASONI & PAHISSA, 2020).

## CONTEXTO SOCIO-HISTÓRICO EM QUE SURGE “WIN GLOBAL”

A organização “Mulheres no campo nuclear - WiN Global” está completando 30 anos, pois teve a sua primeira reunião constitucional em 1993 (<https://win-global.org/about/history>) contando com mulheres representando o Canadá, Alemanha, França, Suíça, Suécia, Holanda, Finlândia e EUA, vindos de diferentes organizações: Associação Nuclear Canadense, Inforum Alemanha, Comissão Francesa de Energias Alternativas e Energia Atômica (CEA), Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen (VSE), Ringhals NPP, IVO Finlândia, ECN Holanda e USCEA.

A ideia central para a criação da WiN foi opor-se à percepção de que a indústria nuclear era um mundo puramente masculino (AIEA, 2018) e, desta forma, oferecer um modelo valioso para as mulheres jovens, com dois objetivos principais:

- I. apoiar e incentivar as mulheres que trabalham nas ciências e tecnologias nucleares.
- II. incentivar a promoção da compreensão e do conhecimento dos benefícios da utilização pacífica da energia nuclear pelo público, através de redes ativas a nível nacional, regional e internacional. A WiN Global conta atualmente com membros, predominantemente mulheres, de 129 países diferentes, pertencentes a capítulos ou individualmente. Atualmente, 47 países têm capítulos próprios e há também capítulos regionais como WiN Europa e WiN África e capítulos internacionais como WiN IAEA (inclui mulheres que trabalham na AIEA).

A partir de 2021 passa a existir um novo capítulo internacional: o *WiN Global Young Generation*, que visa centralizar e promover atividades voltadas para a nova geração, formada por jovens de capítulos de diversos países como França, Japão, Taiwan, Indonésia, Ucrânia, Reino Unido, Hungria, que também conta com 2 jovens ligadas ao setor nuclear da Argentina, 2 do Brasil e 1 do México.

## **WIN NA AMÉRICA LATINA E O PROCESSO DE CRIAÇÃO DE WIN ARCAL**

Vários países criaram localmente os seus respectivos capítulos nacionais da WiN Global nas últimas décadas. WiN Argentina e WiN Brasil foram os primeiros capítulos criados na região latino-americana, organizações focadas em mulheres que trabalham nas diversas áreas de energia nuclear e aplicações de radiação.

Como mencionado anteriormente, ARCAL é hoje uma rede de 22 países da região, que coloca a tecnologia nuclear ao serviço da vida do nosso povo. ARCAL constitui um sólido mecanismo de cooperação que apoia projetos coordenados, cursos, formação de recursos humanos, estabelece redes de informação e base de dados, harmoniza padrões, protocolos e procedimentos, e conta com fundos de cooperação técnica da AIEA. A própria AIEA por sua vez é a organização intergovernamental criada em 1957 com o objetivo de promover o uso seguro e pacífico da energia nuclear e garantir, através de um sistema de salvaguardas, que as atividades e materiais nucleares não são desviados para usos não pacíficos, conforme prescrito no Tratado de Não Proliferação. Fazem parte da ARCAL os seguintes estados: Argentina, Belize, Bolívia, Brasil, Colômbia, Costa Rica, Chile, Cuba, República Dominicana, Equador, El Salvador, Guatemala, Haiti, Honduras, México, Nicarágua, Jamaica, Panamá, Paraguai, Peru, Uruguai e Venezuela.

Atualmente, o capítulo regional Mulheres na área Nuclear ARCAL (WiN ARCAL) está criado, e já está operacional.

## **OPINIÃO PÚBLICA SOBRE ENERGIA NUCLEAR**

Qualquer tecnologia pode ser bem aceita pela opinião pública ou o contrário pode acontecer, dependendo de como esse conhecimento chega. O público recebeu as primeiras informações sobre a energia nuclear através das explosões das bombas atômicas que puseram fim à Segunda Guerra Mundial. Assim, a questão da energia nuclear até hoje desperta suspeitas, que só informações corretas podem dissipar, pois o que oferece risco à sociedade é a falta de informação. Neste sentido, as atividades de aceitação pública da energia nuclear devem ser realizadas para alcançar a máxima eficácia e satisfazer o “direito de saber” da nação (FERNANDES DE ALMEIDA *et al*, 2019). Mulder (2012) destaca em sua análise que a energia nuclear, como qualquer outro assunto importante para a sociedade, está ligada à forma como os respectivos governos conduzem a discussão. Os

capítulos nacionais da WiN Global têm como um dos seus principais objetivos levar ao público os diversos benefícios da energia nuclear pois existe um grande desconhecimento neste domínio por parte do público. Massarani & Castro Moreira (2016) realizaram pesquisas sobre as atividades das ciências da comunicação no Brasil desde o século XIX, e reconhecem o grande progresso que foi feito, mas da mesma forma, ainda há um longo caminho a percorrer para fornecer comunicação de qualidade em ciência e tecnologia para a sociedade brasileira.

Existem bons exemplos na literatura sobre os fatores socioeconômicos e outros que contribuem para a aceitação da energia nuclear em diferentes países. Em 2007, Rodriguez & Diaz já propunham que a informação sobre energia nuclear deveria ser promovida através de modos de comunicação que envolvessem a experiência direta dos cidadãos (NGUYEN & YIM, 2018). Han, Kim & Choi (2014) publicaram uma pesquisa sobre como a educação modificou a aceitação social do uso da energia nuclear. Tantitaechochart, Paoprasert & Silva (2020) concluíram que a forma de obter aceitação desta tecnologia, para a construção de uma usina nuclear em determinado local, é fornecendo informações à população, para inspirar confiança e percepção dos benefícios. Espluga Trenc *et al.* (2017) apresentaram um referencial teórico que integra contribuições de diversas tradições sobre percepção de risco. Em termos gerais, enquanto os promotores e reguladores tendem a enfatizar as dimensões sanitárias/ambientais e as dimensões econômicas (valorizando a riqueza que podem trazer ao território), os grupos de oposição também incluem dimensões socioculturais e políticas/institucionais (FERREIRA & SOARES, 2012; HANSEN & MACHADO, 2018). Wang & Kim (2018) conduziram uma modelagem de análise comparativa sobre as atitudes públicas em relação à energia nuclear abrangendo 27 países europeus. A percepção a nível individual dos benefícios que a energia nuclear pode trazer explica a maior variação na aceitação, seguida pela percepção do risco e da confiança nas autoridades e na tecnologia. A nível contextual, a produção de eletricidade, o ambientalismo e a própria ideologia influenciam a aceitação de novas tecnologias. Além disso, e não menos importante, a aceitação da energia nuclear depende do contexto educacional, institucional e sociocultural do público.

## **INTEGRAÇÃO LATINO-AMERICANA**

Na opinião de Osterhammel (2014), o nascimento das relações internacionais, tal como as conhecemos hoje, foi resultado da transformação do mundo, dominado pelo Ocidente no século XIX. González Molina (2015) sustenta que a América Latina se caracterizou, nos anos noventa e nos primeiros anos deste século, pela euforia de implementar um “regionalismo aberto” com a criação de: 1) o Mercosul, assinado em 1991 por Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai e, 2) o Acordo de Livre Comércio da América do Norte (NAFTA), assinado por Canadá, Estados Unidos e México em 1994.

Foi de enorme importância, para a sociedade latino-americana e exemplo para o resto do mundo, a criação pelo Brasil e pela Argentina da Agência Brasil-Argentina de Contabilidade e Controle de Materiais Nucleares (ABACC), para verificar o compromisso assumido de utilizar a energia nuclear apenas para fins pacíficos, renunciando assim aos dispositivos explosivos (DO CANTO, 2016; TRINDADE, 2017). Assim, os dois países latino-americanos com tecnologia mais avançada acabaram com a rivalidade, reforçando estruturas de paz e cooperação na região, como UNASUL, CELAC e outras.

Uma forma objetiva de ver a evolução das relações internacionais na América Latina ao longo do tempo é analisar o número de artigos publicados sobre temas relacionados. Para isso foi utilizada a base de dados *Scielo Citation Index*. Esta base de dados fornece artigos de literatura acadêmica nas áreas de ciências, ciências sociais, artes e humanidades das principais publicações de acesso aberto da América Latina, Portugal, Espanha e África do Sul, publicados em espanhol, inglês ou português desde 2002.

Para este levantamento foi utilizado o cruzamento das palavras-chave: *política externa + América Latina (AL)*; *relaciones internacionales+AL* e *sociología+AL* nos períodos 2002-2010 e 2002-2020. Além disso, o número de artigos publicados nesses intervalos foi registrado quando as palavras-chave foram *Latin America Integration* e paralelamente *Integración Latinoamericana* (Integração da América Latina) (Fig. 1). A pesquisa mostra um claro aumento no interesse por manifestações nas áreas de Política Externa, Relações Internacionais e Integração Latino-Americana na última década em comparação com a década anterior. Tanto o número de publicações sobre Integração Latino-Americana escritas em espanhol como em inglês (4 vezes maior) mostram a mesma tendência.

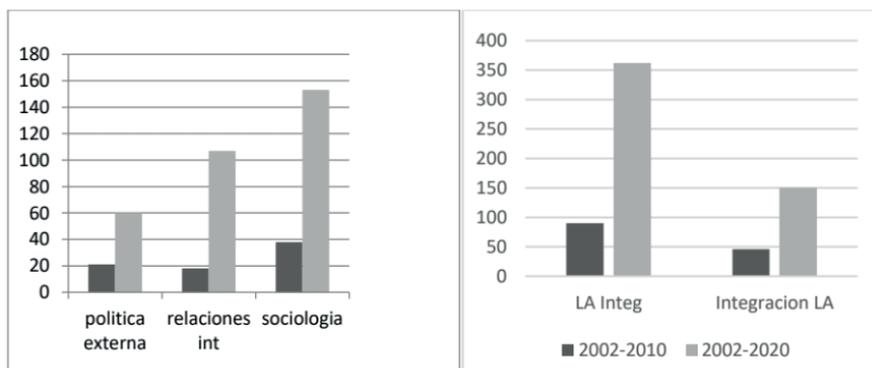


Figura 1. Esquerda) Número de artigos publicados utilizando o cruzamento das palavras: *política externa+AL*; *relaciones internacionales+AL* y *sociología+AL* en los períodos 2002-2010 (gris oscuro) y 2002-2020 (gris claro); Direita) Número de artículos publicados utilizando palabras claves: *Latin America Integration* e paralelamente *Integración Latinoamericana* nos mesmos períodos.

A menção e a evolução das atividades nucleares e a participação das mulheres nelas, ao longo do tempo, estão representadas na Figura 2, que mostra a quantidade de artigos publicados em dois períodos: de 2002 a 2010 e de 2002 a 2020, utilizando o cruzamento de palavras-chave: *Mujeres+Energía Nuclear* ou *Tecnología Nuclear* e por outro lado: *Mujeres+Energía Nuclear* ou *Tecnología Nuclear* nos períodos 2002-2010 (cinza escuro) e 2002-2020 (cinza claro).

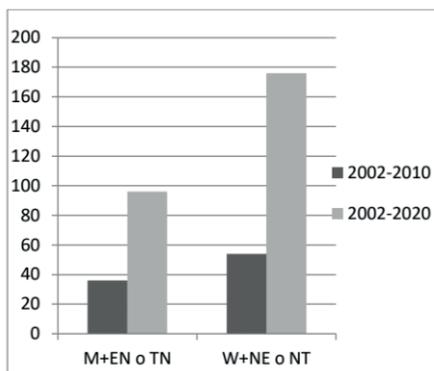


Figura 2. Número de artículos publicados utilizando el cruzamiento de palabras claves: *Mujeres+Energía Nuclear o Tecnología Nuclear* e por outro lado: *Women+Nuclear Energy o Nuclear Technology* nos períodos de 2002-2010 (cinza escuro) e 2002-2020 (cinza claro).

Há um aumento de trabalhos publicados que mencionam as mulheres, conjuntamente com energia nuclear ou a tecnologia nuclear, sejam esses trabalhos publicados em inglês ou espanhol.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste artigo foi dar a conhecer o que são as organizações de mulheres na área nuclear: WiN Global e os capítulos nacionais, como WiN Argentina ou WiN Brasil, e o capítulo regional WiN ARCAL, dentro do contexto do desenvolvimento da energia nuclear nos países latino-americanos. A energia nuclear depende, para o seu desenvolvimento, de formação e investimentos em ciência, tecnologia e inovação (CTI). Uma força de trabalho que incorpore melhor a diversidade da sociedade, incluindo a representação das mulheres, também ajuda a construir a confiança da sociedade em tecnologias de ponta, como as tecnologias nucleares. Os capítulos WIN, tal como outras organizações e redes de mulheres científicas e técnicas da região, realizam atividades com vista a sensibilizar as pessoas sobre as desigualdades de género que ainda persistem na CTI.

A promoção da equidade na representação feminina e masculina na CTI é necessária não só por uma questão de justiça e dignidade humana, mas também porque é mais eficiente em termos económicos, melhora a qualidade da investigação e o desempenho

dos sistemas e, conseqüentemente, é uma oportunidade para avançar corretamente em direção ao desenvolvimento sustentável. É urgente tentar combater as alterações climáticas com energias limpas, eficientes e estáveis, como a energia nuclear. A integração latino-americana não pode prescindir da promoção dos campos do conhecimento onde já existem importantes iniciativas e confluências de interesses, como a energia nuclear. As mulheres da região latino-americana são chamadas a dar a sua contribuição.

## REFERÊNCIAS

Argüello, I. 2009. The Future of Nuclear Power in Latin America. Buenos Aires: Insights from the field, // [archive.constantcontact.com/fs011/1102561686327/archive/1102680733836.html](http://archive.constantcontact.com/fs011/1102561686327/archive/1102680733836.html)

Cangaço Trindade, A.A. 2017. A Obrigação Universal de Desarmamento Nuclear. Brasília: FUNAG, 233p.

Chaunu, P. 1979. História da América Latina. São Paulo: Rio de Janeiro: DIFEL. p. 11.

Chmielewski, A.G. 2023. Radiation technologies: The future is today. **Radiation Physics and Chemistry**, 213, 111233.

Espuga Trenc, J., Medina, B., Presas, A., Rubio-Varas, M. & de la Torre, J. 2017. "Las dimensiones sociales de la percepción de la energía nuclear. Un análisis del caso español (1960-2015)". **Revista Internacional de Sociología**, v. 75 (4), e075. doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ris.2017.75.4.17.02>

Fernandes de Almeida, V. *et al.* 2019. **Evaluation-of-the-acceptance-and-knowledge-of-the-Brazilian-population-on-nuclear-science-and-technology** <https://www.world-nuclear-university.org/wadmin/NUCSite/media/WNU/Programmes/Nuclear%20Olympiad/Vitor-Fernandes-de-Almeida-Evaluation-of-the-acceptance-and-knowledge-of-the-Brazilian-population-on-nuclear-science-and-technology.pdf>.

Ferreira, V. V. M. & Soares, W. A. 2012. Insucessos em empreendimentos nucleares devido a falhas em processos de Comunicação Pública. Intercom, **Rev. Bras. Ciênc. Comun.** v. 35 n. 2. <https://doi.org/10.1590/S1809-58442012000200016>.

Franchini, M.; Viola, E.; Barros-Plataiu, A. 2017. Los desafíos del antropoceno: de la política ambiental internacional hacia la gobernanza global. **Ambiente & Sociedade**, v.20 (3). <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc214v2022017>.

Gonzalez Molina, R.I. 2015. Venturas y desventuras de las actuales integraciones latino-americanas. Fortunes and misfortunes of current Latin American integration. **Economía Informa**, v. 392, p. 65-95.

Han, E. O., Kim, J. R. & Choi, Y. S. 2014. Korean students' behavioral change toward nuclear power generation through education. **Nuclear Engineering and Technology**, v.46 (5), p. 707-718.

Hansen, G. L.; Machado, L. 2018. Opinião pública sobre energia nuclear enquanto sistema perito nas sociedades de risco da modernidade. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, v. 6 (3), p. 1-24. DOI: 10.15392/bjrs.v6i3.492

IAEA, 2018 [https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull/bull594\\_nov2018\\_es\\_cor.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull/bull594_nov2018_es_cor.pdf)

Kainuma, M., Miwa, K., Ehara, T., Akashi, O., Asayama, Y., 2013. A low-carbon society: global visions, pathways, and challenges. **Climate Policy** 13, S5–S21. <https://doi.org/10.1080/14693062.2012.738016>

Kress, K. 2011. **La política nuclear en América Latina. Breve análisis sobre el uso de la energía nuclear en América Latina.** Fundación Friedrich Ebert Stiftung, FES-ILDIS Quito.

Liesner de Souza, L.E. & Carneiro Lima, C. 2019. Energia Nuclear: Desafio Atual, Universalização e Medo Social. **Don Helder-Revista de Direito**, v. 2, n. 2, p. 63-90.

Marcuzzo do Canto, O.A. Organizador. 2016. **O modelo ABACC: Um marco no desenvolvimento das relações entre Brasil e Argentina.** Santa Maria, RS, Ed. UFSM, 240p.

Massarani, L.; Castro Moreira, I. 2016. Science communication in Brazil: A historical review and considerations about the current situation. **An. Acad. Bras. Ciênc.** v. 88 (3), Rio de Janeiro, Epub Aug 15.

Montes, L. M.; Dawson, S. P. 2019. **La brecha de género en Matemática, Computación y Ciencias Naturales: un abordaje desde América Latina.** Primera edición electrónica, D. R. © Sociedad Mexicana de Física A.C. ISBN 978-607-98384-3-0.

Mulder, K. 2012. The dynamics of public opinion on nuclear power. Interpreting an experiment in the Netherlands. **Technological Forecasting and Social Change.** v. 79, n. 8, p. 1513-1524.

Nguyen, V.P., Yim, M. S. 2018. Examination of different socioeconomic factors that contribute to the public acceptance of nuclear energy. **Nuclear Engineering and Technology**, v.50, p. 767-772.

Osterhammel, J. (2014). **The transformation of the world: a global history of the nineteenth century.** Princeton: Princeton University Press.

RAE (2005). **Diccionario Panhispánico de Dudas.** Madrid: Santillana Educación. ISBN 8429406239.

Sadekin, S., Zaman, S., Mahfuz, M., Sarkar, R. 2019. Nuclear power as foundation of a clean energy future: A review. **Energy Procedia** 160, p. 513-518. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.200>

Santos, A. G. M., Suzart, K. F., Rodrigues, P.S., del Mastro, N. L. 2022. Study on the sociocultural profile of women working in a nuclear area. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, v.1. <https://doi.org/10.15392/bjrs.v10i3A.1882>.

Tantiaechochart, S., Paoprasert, N., Silva, K. 2020. Analyzing local perceptions toward the new nuclear research reactor in Thailand. **Nuclear Engineering and Technology**, v. 52, (12), 2958-2968. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.05.013>.

Torres, G. 2013. **Encyclopedia of Latin American Popular Music.** ABC-CLIO. p. xvii. ISBN 9780313087943.

Wang, J. & Kim, S. 2018. Comparative Analysis of Public Attitudes toward Nuclear Power Energy across 27 European Countries by Applying the Multilevel Model. **Sustainability**, v. 10, (1518), 1-21. <https://doi.org/10.3390/su10051518>.

WNA - World Nuclear Association (2010), **Outline History of Nuclear Energy**, <http://world-nuclear.org/info/inf54.html>.

WNA - World Nuclear Association (2011), **Nuclear Power in the World today**, <http://worldnuclear.org/info/inf01.html>

# O FUTURO DA ROBÓTICA: AVANÇOS E PERSPECTIVAS NA ROBÓTICA COGNITIVA PARA A PRÓXIMA DÉCADA

*Data de aceite: 01/07/2024*

### **Márcio Mendonça**

Universidade Tecnológica Federal do  
Paraná  
PPGEM-CP - Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica PP/  
CP  
Cornélio Procópio - PR  
<http://lattes.cnpq.br/5415046018018708>

### **Marcos Banheti Rabello Vallim**

Universidade Tecnológica Federal do  
Paraná  
Departamento Acadêmico de Engenharia  
Elétrica (DAELE)  
Cornélio Procópio – PR  
<http://lattes.cnpq.br/2326190172340055>

### **Michelle Eliza Casagrande Rocha**

Universidade Norte do Paraná – Unopar  
– Kroton  
Londrina – PR  
<http://lattes.cnpq.br/7114274011978868>

### **Fabio Nogueira de Queiroz**

Centro Paula Souza  
Departamento Computação-FATEC  
Ourinhos-SP  
<http://lattes.cnpq.br/9845468923141329>

### **Marcio Jacometti**

Universidade Tecnológica Federal do  
Paraná  
Departamento acadêmico das ciências  
humanas e sociais aplicadas (DACHS)  
Cornélio Procópio – PR  
<http://lattes.cnpq.br/8509336134084374>

### **Wagner Fontes Godoy**

Universidade Tecnológica Federal do  
Paraná Departamento Acadêmico de  
Engenharia Elétrica (DAELE)  
Cornélio Procópio - Pr  
<http://lattes.cnpq.br/7337482631688459>

### **Francisco de Assis Scannavino Junior**

Universidade Tecnológica Federal do  
Paraná Departamento Acadêmico de  
Engenharia Elétrica (DAELE) – Cornélio  
Procópio - Pr  
<http://lattes.cnpq.br/4513330681918118>

### **Gustavo Henrique Bazan**

Instituto Federal do Paraná, Campus  
Jacarezinho  
Jacarezinho - PR  
<http://lattes.cnpq.br/7076940949764767>

### **Henrique Cavalieri Agonilha**

Graduando na Universidade Filadélfia  
(Unifil)  
Londrina - PR  
<http://lattes.cnpq.br/9845468923141329>

**Andressa Haiduk**

Dimension Engenharia  
Ponta Grossa - PR  
<http://lattes.cnpq.br/2786786167224165>

**Angelo Feracin Neto**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE)  
Cornélio Procópio – PR  
<http://lattes.cnpq.br/0580089660443472>

**Vera Adriana Azevedo Hypolito**

Centro Paula Souza  
Departamento Computação-Etec Estácio de Sá  
Ourinhos-SP  
<http://lattes.cnpq.br/6169590836932698>

**Carlos Alberto Paschoalino**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE)  
Cornélio Procópio – PR  
<http://lattes.cnpq.br/0419549172660666>

**Pedro Henrique Calegari**

Engenheiro Mecânico | Engenheiro de Segurança do Trabalho | Gerente de Projetos  
Unopar Universidade Norte do Paraná – Gerente projetos Bosch Car Service  
Jacarezinho-PR  
<http://lattes.cnpq.br/1239023712415204>

**Roberto Bondarik**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná Departamento de Ciências Humanas e  
Sociais (DACHS)–  
Cornélio Procópio - Pr  
<http://lattes.cnpq.br/6263028023417758>

**Vicente de Lima Gongora**

Faculdade da Industria Senai  
Londrina - PR  
<http://lattes.cnpq.br/6784595388183195>

**Luiz Francisco Sanches Buzzacchero**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Departamento de Engenharia Elétrica – Daele  
Cornélio Procópio - PR  
<http://lattes.cnpq.br/1747856636744006>

**Eduardo Filgueiras Damasceno**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Departamento Acadêmico de Computação (DACOM)  
Cornélio Procópio - PR  
<http://lattes.cnpq.br/7333630388674575>

**RESUMO:** O campo da robótica está preparado para avanços revolucionários na próxima década, particularmente na robótica cognitiva. Este artigo abrangente examina o estado atual da robótica cognitiva, destacando as tecnologias-chave que impulsionam seu desenvolvimento. Aprendizado de máquina, processamento de linguagem natural e sensores avançados estão aprimorando significativamente as capacidades robóticas, tornando-os mais autônomos e adaptáveis. Os resultados esperados incluem maior autonomia, melhor interação humano-robô e maior adaptabilidade a ambientes dinâmicos. Esses avanços prometem revolucionar indústrias como saúde, manufatura e logística, transformando a forma como humanos interagem e se beneficiam das tecnologias robóticas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Robótica Cognitiva, Aprendizado de Máquina, Interação Humano-Robô

## THE FUTURE OF ROBOTICS: ADVANCES AND PERSPECTIVES IN COGNITIVE ROBOTICS FOR THE NEXT DECADE

**ABSTRACT:** The field of robotics is poised for groundbreaking advancements in the coming decade, particularly in cognitive robotics. This comprehensive article examines the current state of cognitive robotics, highlighting the key technologies driving its development. Machine learning, natural language processing, and advanced sensors are significantly enhancing robotic capabilities, making them more autonomous and adaptable. Expected outcomes include greater autonomy, improved human-robot interaction, and better adaptability to dynamic environments. These advancements promise to revolutionize industries such as healthcare, manufacturing, and logistics, ultimately transforming how humans interact with and benefit from robotic technologies.

**KEYWORDS:** Cognitive Robotics, Machine Learning, Human-Robot Interaction

## INTRODUÇÃO

A robótica evoluiu de dispositivos mecânicos básicos para sistemas sofisticados capazes de realizar tarefas complexas. A próxima fronteira nesta evolução é a robótica cognitiva, que integra a inteligência artificial (IA) para permitir que os robôs percebam, aprendam, raciocinem e interajam de maneiras antes inimagináveis. À medida que indústrias e sociedades adotam cada vez mais essas tecnologias, compreender sua trajetória torna-se crucial. Este artigo investiga os avanços antecipados na robótica cognitiva nos próximos dez anos, destacando as principais áreas de impacto e direções futuras. Tecnologias Fundamentais (SICILIANO, 2012)

## ROBÓTICA COGNITIVA

A robótica cognitiva envolve o desenvolvimento de robôs que podem executar tarefas de forma autônoma, imitando funções cognitivas humanas como percepção, aprendizado, resolução de problemas e tomada de decisão. As principais tecnologias incluem aprendizado de máquina, processamento de linguagem natural (NLP), visão computacional e integração de sensores. Esses robôs são projetados para operar em ambientes dinâmicos e não estruturados, tomando decisões em tempo real com base em entradas sensoriais (OSKOOYEE et al., 2012).

**Aprendizado de Máquina e IA:** Os avanços em aprendizado de máquina e IA estão no coração da robótica cognitiva. Algoritmos capazes de aprendizado profundo e aprendizado por reforço permitem que os robôs melhorem seu desempenho ao longo do tempo, aprendendo com suas interações com o ambiente. Modelos de IA, como os desenvolvidos pela OpenAI e Google *DeepMind*, estão abrindo caminho para uma cognição robótica mais sofisticada (HAYKIN, 2009a).

**Processamento de Linguagem Natural (NLP):** O NLP permite que os robôs compreendam e respondam à linguagem humana, tornando as interações com os robôs mais intuitivas e naturais. Esta tecnologia é crucial para aplicações em atendimento ao cliente, saúde e assistentes pessoais (ALMEIDA et al., 2021)

**Visão Computacional:** Esta tecnologia permite que os robôs interpretem e compreendam informações visuais do mundo. Ao combinar visão computacional com aprendizado de máquina, os robôs podem reconhecer objetos, navegar em ambientes e realizar tarefas complexas que exigem percepção visual (KUMAR et al., 2018) (MENDONÇA et al., 2024b).

**Integração de Sensores:** Os sensores fornecem aos robôs os dados necessários para interagir com seu ambiente. Isso inclui sensores de toque, acelerômetros, giroscópios e câmeras. A integração avançada de sensores permite interações mais precisas e adaptativas.

## Saúde

Os robôs cognitivos estão transformando a saúde ao auxiliar em cirurgias, fornecer companhia e cuidados para idosos e gerenciar tarefas administrativas. Robôs como o Sistema Cirúrgico da Vinci exemplificam como as capacidades cognitivas podem melhorar a precisão nas cirurgias. Nos cuidados aos idosos, robôs equipados com reconhecimento de emoções e IA conversacional oferecem companhia e monitoram condições de saúde, melhorando assim a qualidade de vida dos idosos.

## Indústria e Manufatura

Na manufatura, os robôs cognitivos melhoram a eficiência e a flexibilidade ao se adaptarem a novas tarefas sem a necessidade de reprogramação extensa. Eles podem analisar dados de produção, prever necessidades de manutenção e otimizar fluxos de trabalho. Empresas como FANUC e ABB estão liderando na integração de capacidades cognitivas em robôs industriais, aumentando a produtividade e reduzindo o tempo de inatividade.

## Serviço e Interação com o Cliente

Os robôs cognitivos estão sendo cada vez mais utilizados em funções de atendimento ao cliente, proporcionando assistência personalizada e melhorando a experiência do cliente. Robôs em ambientes de varejo podem ajudar os clientes a encontrar produtos, responder a perguntas e gerenciar o estoque. A capacidade de entender e processar a linguagem natural permite que esses robôs lidem autonomamente com uma ampla gama de interações com os clientes.

## PERSPECTIVAS

### Integração com IoT

A integração de robôs cognitivos com a Internet das Coisas (IoT) permitirá sistemas mais interconectados e inteligentes. Essa sinergia permitirá que os robôs acessem e processem grandes quantidades de dados de dispositivos IoT, aprimorando sua tomada de decisão e eficiência operacional.

### Implicações Éticas e sociais

À medida que os robôs cognitivos se tornam mais prevalentes, abordar as implicações éticas e sociais é crucial. Questões como deslocamento de empregos, privacidade de dados e o tratamento ético de sistemas autônomos precisam ser cuidadosamente gerenciadas. O desenvolvimento de diretrizes e políticas éticas será essencial para garantir que os benefícios da robótica cognitiva sejam distribuídos de forma equitativa (MENDONÇA et al., 2024a)

### Inovação Contínua

A pesquisa e a inovação contínuas impulsionarão a evolução da robótica cognitiva. O investimento em pesquisa e desenvolvimento pelos setores privado e público acelerará os avanços tecnológicos, levando a novas aplicações e capacidades. A colaboração entre academia, indústria e governo será vital para fomentar a inovação e enfrentar os desafios associados à robótica cognitiva.

A próxima década promete ser transformadora para a robótica, com a robótica cognitiva liderando o caminho. À medida que essas tecnologias avançam, elas revolucionarão indústrias, melhorarão a saúde e aprimorarão a vida cotidiana. No entanto, para realizar todo o potencial da robótica cognitiva, será necessário abordar as preocupações éticas e garantir que os benefícios sejam acessíveis a todos. O futuro da robótica é brilhante e, com orientação e inovação cuidadosas, os robôs cognitivos se tornarão uma parte integral de nossa sociedade (MENDONÇA et al., 2021).

## CONTEXTO HISTÓRICO E EVOLUÇÃO DA ROBÓTICA:

### Primeiros Conceitos e Autômatos

*Alguns dos tópicos relevantes ao histórico e a evolução de robótica de um modo geral*

A história da robótica remonta à antiguidade, onde os primeiros conceitos de autômatos começaram a emergir. Na Grécia Antiga, filósofos e inventores como Arquimedes e Heron de Alexandria desenvolveram dispositivos mecânicos que imitavam movimentos humanos e animais, utilizando sistemas de polias, rodas e pesos. Esses autômatos eram frequentemente usados como entretenimento para a nobreza e como demonstrações de engenhosidade técnica. Esses dispositivos rudimentares marcaram os primeiros passos no desenvolvimento da robótica, apesar de suas limitações tecnológicas.

#### *Revolução Industrial e Avanços Tecnológicos*

A Revolução Industrial no século XVIII trouxe avanços significativos na mecanização e automação, que foram essenciais para a produção em massa. A introdução de máquinas a vapor e motores elétricos transformou a manufatura, permitindo a criação de máquinas mais eficientes e precisas. Inventores como Richard Arkwright, com sua máquina de fiar, e Eli Whitney, com sua despolpadora de algodão, contribuíram para o desenvolvimento de sistemas automáticos de fabricação. Essas inovações abriram caminho para as primeiras linhas de montagem automatizadas, um precursor direto dos robôs industriais modernos.

#### *Era dos Computadores e Robôs Industriais*

O século XX viu a robótica evoluir significativamente com a invenção do primeiro robô industrial. Utilizado pela primeira vez em uma linha de montagem da General Motors em 1961, o Unimate revolucionou a indústria automotiva ao demonstrar a viabilidade de robôs programáveis realizando tarefas repetitivas com alta precisão e eficiência. Este desenvolvimento marcou o início da era dos robôs industriais e estabeleceu um padrão para a automação em diversas indústrias (MENDONÇA et al., 2023).

#### *Robótica Cognitiva e Inteligência Artificial*

Com o avanço da ciência da computação e da inteligência artificial (IA) nas décadas seguintes, a robótica começou a incorporar tecnologias que permitiam maior autonomia e inteligência. Pesquisas lideradas por cientistas como John McCarthy e Marvin Minsky procuravam criar máquinas que pudessem pensar e aprender como seres humanos. A integração de IA em robôs permitiu a criação de sistemas mais inteligentes e adaptáveis, capazes de realizar tarefas complexas e interagir com ambientes dinâmicos. Exemplos

notáveis incluem o ASIMO da Honda e os robôs humanoides da Boston Dynamics, que demonstram habilidades avançadas de movimento e interação. Marvin Minsky, por sua vez, teve a relevância de continuar o desenvolvimento dos pilares da IA, o que levou à construção que se tem na atualidade. O professor bem definiu a inteligência artificial como “a ciência de fazer que as máquinas façam coisas que exigiriam inteligência se feitas por um ser humano” (HAYKIN, 2009b).

### *Aplicações Modernas e Futuros Desenvolvimentos*

Atualmente, a robótica abrange uma ampla gama de aplicações, desde robôs industriais e de serviço até robôs médicos e exploradores espaciais. Na medicina, robôs como o Da Vinci são usados em cirurgias minimamente invasivas, proporcionando maior precisão e reduzindo o tempo de recuperação dos pacientes. Na exploração espacial, robôs como o *rover Perseverance* da NASA estão explorando Marte e coletando dados valiosos sobre o planeta vermelho. Futuros desenvolvimentos na robótica prometem avanços contínuos em IA, aprendizado de máquina e sensores avançados, com expectativas de robôs cada vez mais autônomos e colaborativos, capazes de transformar setores como saúde, manufatura, logística e serviços. (CRAIG, 2005; SICILIANO, 2012).

## **EXPLORAÇÃO DETALHADA DO APRENDIZADO DE MÁQUINA E IA NA ROBÓTICA**

O aprendizado de máquina (ML) é uma subárea da inteligência artificial (IA) focada no desenvolvimento de algoritmos que permitem às máquinas aprenderem a partir de dados e melhorarem seu desempenho ao longo do tempo sem serem explicitamente programadas. Na robótica cognitiva, ML desempenha um papel crucial, permitindo que robôs percebam, compreendam e interajam com seu ambiente de forma mais humana e adaptável. A seguir, discutiremos as principais técnicas de ML, os tipos de algoritmos utilizados e suas aplicações específicas na robótica cognitiva. Técnicas de Aprendizado de Máquina Aprendizado Supervisionado

Definição: Envolve a utilização de um conjunto de dados rotulados para treinar o modelo. O algoritmo aprende a mapear entradas para saídas corretas com base nesses exemplos.

### **Algoritmos: Regressão Linear, Máquinas de Vetores de Suporte (SVM), Redes Neurais Artificiais (ANN), e Árvore de Decisão**

Aplicações na Robótica Cognitiva: Reconhecimento de objetos, classificação de atividades humanas, e navegação autônoma. Por exemplo, redes neurais convolucionais (CNNs) são amplamente utilizadas para processamento de imagem e reconhecimento de padrões visuais em robôs de serviço e de assistência.

## Aprendizado Não Supervisionado

Definição: Utiliza dados não rotulados para encontrar padrões e estruturas inerentes no conjunto de dados. O algoritmo tenta agrupar ou associar os dados sem orientação externa.

Algoritmos: Algoritmo *K-means*, Algoritmo de Agrupamento Hierárquico, e Mapas Auto-organizáveis (SOM).

Aplicações na Robótica Cognitiva: Agrupamento de sensores, segmentação de ambientes e descoberta de anomalias. Em robótica cognitiva, o aprendizado não supervisionado pode ser usado para mapear ambientes desconhecidos ou categorizar novas experiências sem prévia rotulação.

## Aprendizado por Reforço (RL)

Definição: Baseia-se em recompensas e penalidades para ensinar um agente a realizar uma tarefa. O agente aprende a partir das interações com o ambiente, buscando maximizar a recompensa cumulativa.

Algoritmos: *Q-Learning*, *Deep Q-Networks* (DQN), e Algoritmos de Política (*Policy Gradient Methods*) (SUTTON; BARTO, 2017).

Aplicações na Robótica Cognitiva: Controle de movimento, planejamento de trajetória, e manipulação de objetos. Robôs de assistência domiciliar, por exemplo, usam RL para aprender a realizar tarefas domésticas complexas, como cozinhar ou arrumar a casa.

## Algoritmos Utilizados na Robótica Cognitiva

Redes Neurais Convolucionais (CNNs)

Descrição: Especialmente eficazes no processamento de dados visuais, as CNNs são compostas por camadas convolucionais que extraem características hierárquicas de imagens (Hanju Li, 2021).

Aplicações: Visão computacional em robôs de vigilância, reconhecimento facial em robôs sociais, e navegação visual autônoma.

## Redes Neurais Recorrentes (RNNs)

Descrição: Adequadas para dados sequenciais, as RNNs possuem conexões de feedback que permitem o processamento de séries temporais.

Aplicações: Reconhecimento de voz em robôs assistentes, tradução automática em robôs de comunicação, e predição de movimentos humanos para interação segura (ZHANG et al., 2020).

## Máquinas de Vetores de Suporte (SVM)

Descrição: SVMs são utilizadas para classificação e regressão, criando hiperplanos que separam os dados em diferentes classes.

Aplicações: Classificação de gestos para interfaces homem-robô, detecção de anomalias em sistemas de segurança, e categorização de objetos em ambientes domésticos. Aplicações Específicas na Robótica Cognitiva

Interação Humano-Robô (HRI) Descrição: Utilização de técnicas de ML para melhorar a interação entre humanos e robôs, permitindo que robôs entendam comandos de voz, gestos, e emoções humanas.

Exemplo: Robôs assistentes em ambientes domésticos que reconhecem e respondem a emoções humanas, ajustando seu comportamento para proporcionar conforto e suporte emocional.

## Navegação e Mapeamento (SLAM)

Descrição: Algoritmos de SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) permitem que robôs construam mapas de ambientes desconhecidos enquanto rastreiam sua própria localização.

Exemplo: Robôs de limpeza que navegam eficientemente em casas, evitando obstáculos e otimizando rotas de limpeza.

### Manipulação de Objetos

Descrição: Aprendizado de técnicas para manipulação de objetos complexos, adaptando-se a diferentes formas, tamanhos e texturas.

Exemplo: Robôs industriais que realizam montagem de componentes em linhas de produção, ajustando automaticamente suas técnicas de prensão e montagem.

De acordo com supracitado de um modo geral pode-se sumarizar da seguinte forma.

As técnicas de aprendizado de máquina desempenham um papel fundamental na robótica cognitiva, permitindo que robôs realizem tarefas complexas de forma autônoma e adaptativa. Com o contínuo avanço dos algoritmos de ML e o aumento da capacidade computacional, as aplicações de robótica cognitiva estão se expandindo rapidamente, transformando setores como manufatura, saúde, e serviços domésticos. Estudos futuros se concentrarão em aprimorar a eficiência dos algoritmos, a segurança na interação humano-robô, e a capacidade dos robôs de aprenderem em tempo real a partir de experiências dinâmicas, as quais a próxima seção apresentará mais detalhes.

## Algumas aplicações da robótica cognitiva

Robótica Cognitiva na Saúde

Estudos de caso sobre aplicações robóticas em cirurgia, cuidados a idosos e tarefas administrativas.

Benefícios, desafios e perspectivas futuras.

## Aplicações Industriais e de Manufatura

Exemplos de robótica cognitiva na manufatura, seu impacto na produtividade e tendências futuras.

Discussão sobre automação, melhorias de eficiência e manutenção preditiva.

Exploração de robôs em indústrias de serviços, interação com clientes e ambientes de varejo.

Impacto na experiência do cliente e operações comerciais.

## Futura Integração com IoT

Potencial para integrar robôs cognitivos com IoT, benefícios e desafios.

Exemplos de sistemas inteligentes e suas aplicações.

Implicações Éticas e Sociais.

Discussão detalhada sobre preocupações éticas, deslocamento de empregos, privacidade de dados e a necessidade de diretrizes éticas.

Pesquisa Contínua e Direções Futuras.

Iniciativas de pesquisa atuais, direções futuras e possíveis avanços na robótica cognitiva.

A análise aprofundada da robótica cognitiva indica um futuro promissor onde os robôs irão aprimorar significativamente diversos aspectos da vida e da indústria. Com a abordagem das preocupações éticas e o incentivo à inovação contínua, os robôs cognitivos desempenharão um papel fundamental na construção de uma sociedade mais inteligente, eficiente e humanizada. Pesquisas futuras devem se concentrar no desenvolvimento de algoritmos avançados de aprendizado de máquina, na melhoria da interação humano-robô e na integração de sensores mais sofisticados. Adicionalmente, é crucial continuar investigando as implicações sociais e éticas da robótica, assegurando que os benefícios sejam distribuídos de forma equitativa e que os riscos sejam mitigados. Esses avanços prometem revolucionar setores como saúde, manufatura e serviços, transformando significativamente as formas de vida e trabalho.

Em resumo, o progresso na robótica cognitiva não só reflete melhorias tecnológicas, mas também exige uma consideração meticulosa das consequências éticas e sociais. Por isso, a colaboração entre engenheiros, cientistas sociais e legisladores será vital

para garantir um futuro em que a tecnologia robótica possa ser plenamente integrada em benefício da sociedade. Posto isso, na próxima seção serão apresentados de forma mais específica alguns dos resultados do objeto dessa investigação científica (MENDONÇA et al., 2023) .

## RESULTADOS ESPERADOS DA ROBÓTICA COGNITIVA

A robótica cognitiva representa uma das fronteiras mais avançadas da tecnologia atual, combinando inteligência artificial (IA) com capacidades robóticas para criar sistemas que podem aprender, adaptar-se e interagir de maneira mais natural com seu ambiente. Este campo emergente promete transformar diversos aspectos da sociedade e da indústria, trazendo melhorias significativas em eficiência, segurança e qualidade de vida. A seguir, exploraremos os resultados esperados da robótica cognitiva, com base em pesquisas recentes e tendências observadas.

**Melhorias na Automação Industrial.** Um dos principais benefícios esperados da robótica cognitiva é a melhoria na automação industrial. Robôs equipados com IA avançada poderão realizar tarefas complexas de maneira mais eficiente e com menos supervisão humana. Isso inclui desde a montagem de componentes em linhas de produção até a inspeção de qualidade e manutenção preditiva. A capacidade de aprender e adaptar-se a novos processos permitirá uma flexibilidade maior na manufatura, reduzindo tempos de inatividade e aumentando a produtividade.

Segundo um relatório da McKinsey & Company (2019), a automação cognitiva pode aumentar a eficiência operacional em até 30%, resultando em economias significativas para as indústrias. Além disso, a integração de robôs cognitivos com sistemas de Internet das Coisas (IoT) permitirá uma coordenação melhorada e a otimização de recursos, criando fábricas mais inteligentes e conectadas.

**Avanços na Saúde.** Na área da saúde, a robótica cognitiva promete revolucionar a maneira como os cuidados médicos são prestados. Robôs cirúrgicos equipados com IA podem realizar procedimentos complexos com maior precisão do que cirurgiões humanos, reduzindo riscos e melhorando os resultados dos pacientes. Além disso, robôs de assistência podem ajudar no cuidado de pacientes idosos ou com mobilidade reduzida, proporcionando suporte físico e monitoramento contínuo de saúde.

Pesquisas indicam que o uso de robôs cognitivos em ambientes hospitalares pode reduzir o tempo de recuperação dos pacientes e aumentar a eficiência dos procedimentos médicos (Murphy et al., 2020). A capacidade desses robôs de analisar grandes volumes de dados médicos em tempo real também pode levar a diagnósticos mais rápidos e precisos, melhorando o atendimento ao paciente e otimizando os recursos hospitalares.

**Interação Humano-Robô (HRI).** A interação humano-robô (*HRI*) é outra área onde a robótica cognitiva está destinada a fazer grandes avanços. Robôs equipados com

processamento de linguagem natural (*NLP*) e reconhecimento de emoções podem interagir de maneira mais intuitiva e empática com os humanos. Isso é particularmente útil em setores como atendimento ao cliente, educação e assistência social.

Estudos mostram que a HRI melhorada pode aumentar a aceitação e a confiança nos robôs, tornando-os parceiros mais eficazes em diversas tarefas (Breazeal, 2017). Por exemplo, em ambientes educativos, robôs cognitivos podem atuar como tutores personalizados, adaptando seu estilo de ensino às necessidades individuais dos alunos e proporcionando feedback em tempo real. Na assistência social, robôs podem fornecer companhia e suporte emocional a idosos, melhorando sua qualidade de vida.

**Navegação e Exploração Autônoma.** A robótica cognitiva também tem aplicações significativas na navegação e exploração autônoma. Robôs equipados com algoritmos de aprendizado de máquina e sensores avançados podem mapear e navegar em ambientes desconhecidos com alta precisão. Isso é particularmente útil em missões de exploração espacial, operações de resgate e inspeções em áreas perigosas.

O *rover Perseverance* da NASA, por exemplo, utiliza IA para navegar e realizar experimentos científicos em Marte de forma autônoma (NASA, 2021). Em operações de resgate, robôs cognitivos podem ser enviados para ambientes perigosos para localizar e resgatar vítimas, reduzindo os riscos para os socorristas humanos.

## Impacto Social e Ético

Os avanços na robótica cognitiva também trazem desafios sociais e éticos que precisam ser abordados. A automação cognitiva pode levar à substituição de empregos humanos em algumas indústrias, exigindo políticas e programas de requalificação para ajudar os trabalhadores a se adaptarem às novas exigências do mercado de trabalho. Além disso, a interação crescente entre humanos e robôs levanta questões sobre privacidade, segurança e a definição de responsabilidade em casos de falha robótica.

Pesquisadores argumentam que é crucial desenvolver diretrizes e regulamentações claras para a implementação de robôs cognitivos, garantindo que seus benefícios sejam distribuídos equitativamente e que os riscos sejam mitigados (Bryson, 2018). A colaboração entre engenheiros, cientistas sociais e legisladores será vital para criar um ambiente onde a robótica cognitiva possa prosperar de maneira ética e segura.

## CONCLUSÃO

A robótica cognitiva promete revolucionar diversos setores, trazendo melhorias substanciais em eficiência, segurança e qualidade de vida. Suas aplicações em automação industrial, saúde, interação humano-robô e navegação autônoma demonstram um potencial transformador. No entanto, os desafios éticos e sociais, como a substituição de empregos e questões de privacidade, precisam ser abordados de maneira proativa. A colaboração entre engenheiros, cientistas sociais e legisladores será essencial para desenvolver políticas que maximizem os benefícios dessas tecnologias de forma equitativa e responsável. Com uma abordagem cuidadosa e interdisciplinar, a robótica cognitiva tem o potencial de redefinir nossa sociedade, promovendo um futuro mais inteligente, seguro e eficiente.

Futuras pesquisas em robótica cognitiva podem se concentrar no desenvolvimento de algoritmos de aprendizado contínuo para robôs em ambientes dinâmicos, na integração de sensores avançados para melhorar a percepção ambiental e a interação humano-robô, e na implementação de aprendizado federado para aprimorar a privacidade e segurança dos dados. Essas áreas promissoras têm o potencial de expandir significativamente as capacidades e aplicações dos robôs cognitivos.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. F. I. DE et al. Identificação de elementos para construção do vocabulário controlado: contribuições do diagnóstico de arquivo. **Informação & Informação**, v. 26, n. 1, p. 601, 31 mar. 2021.

BREAZEL, C. **Social robots: From research to commercialization**. *Proceedings of the IEEE*, v. 105, n. 5, p. 871-883, 2017.

BRYSON, J. J. Patience is not a virtue: **The design of intelligent systems and systems of ethics**. *Ethics and Information Technology*, v. 20, p. 15-26, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10676-018-9448-6>.

CRAIG, J. J. **Introduction to Robotics: Mechanics and Control**. 3. ed. Upper Saddle River, USA: Pearson Prentice Hall, 2005.

HAYKIN, S. **Neural Networks and Learning Machines**. 3. ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, 2009a.

HAYKIN, S. S. **Neural networks and learning machines**. 3. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2009b.

KUMAR, V. et al. **Computer vision based object grasping 6DoF robotic arm using picamera**. *Proceedings - 2018 4th International Conference on Control, Automation and Robotics, ICCAR 2018*. **Anais...Auckland, New Zealand: IEEE**, 2018.

LI, H. **Computer network connection enhancement optimization algorithm based on convolutional neural network**. In: 2021 International Conference on Networking, Communications and Information Technology (NetCIT), Manchester, United Kingdom, 2021. p. 281-284. DOI: 10.1109/NetCIT54147.2021.00063.

NASA. Perseverance rover: **Mars exploration program**. *NASA Science Mars Exploration*, 2021. Disponível em: <https://mars.nasa.gov/mars2020/>. Acesso em: 5 jun. 2024

McKINSEY & COMPANY. **The future of work: The impact of automation on employment and productivity**. *McKinsey Global Institute Report*, 2019.

MENDONÇA, M. et al. Initial Experiments using Game-based Learning Applied in a Classical Knowledge Robotics in In-Person and Distance Learning Classroom. **Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal**, v. 6, n. 4, p. 212–222, jul. 2021.

MENDONÇA, M. et al. ROBÓTICA COGNITIVA: A MENTE POR TRÁS DA MÁQUINA. Em: **Engenharias: qualidade, produtividade e inovação tecnológica 2**. Atena Editora, 2023. p. 155–166.

MENDONÇA, M. et al. **ÉTICA E RESPONSABILIDADE NA CONSTRUÇÃO E USO DE ROBÔS ETHICS AND RESPONSIBILITY IN ROBOT CONSTRUCTION AND USE**. . Disponível em: <<https://revistatecie.crea-pr.org.br/index.php/revista/issue/view/37/89>>. Acesso em: 8 jun. 2024a.

MENDONÇA, M. et al. VISÃO ROBÓTICA NA CONSTRUÇÃO CIVIL: EFICIÊNCIA, PRECISÃO E PRODUTIVIDADE COM SEGURANÇA APRIMORADA. Em: **Engenharias em perspectiva: ciência tecnologia e inovação**. [s.l.] Atena Editora, 2024b. p. 155–166.

MURPHY, R. R. et al. **Introduction to AI robotics**. Cambridge: MIT Press, 2020

OSKOOYEE, K. S. et al. **Robots in love: Evolutionary psychology, artificial life, and cognitive robotics**. Cognitive Informatics & Cognitive Computing (ICCI\*CC), 2012 IEEE 11th International Conference on. **Anais...2012**.

SICILIANO, B. **Springer Tracts in Advanced Robotics: Foreword**. v. 83 STAR

SUTTON, R. S.; BARTO, A. G. **Reinforcement Learning: An Introduction**. 2. ed. Cambridge, USA: MIT Press, 2017. v. 1

ZHANG, J. et al. Recurrent neural network for motion trajectory prediction in human-robot collaborative assembly. **CIRP Annals**, v. 69, n. 1, p. 9–12, 2020.

# PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTO DE APOIO À HEMODIÁLISE

Data de aceite: 01/07/2024

**João Pedro Uglione Da Ros**

Engenharia Mecânica

**Patrícia Magnago**

Engenharia Mecânica

**RESUMO:** As balanças são equipamentos de pesagem essenciais para diversos produtos e processos, dentre eles, na medicina, no procedimento de hemodiálise. Neste, a pesagem dos pacientes é fundamental para a prescrição correta do procedimento, bem como a análise de sua eficácia quanto a remoção de líquido. Este trabalho tem como objetivo utilizar o Modelo Referencial de Processo de Desenvolvimento de Produto (PDP) de Rozenfeld et al. (2006) para desenvolver e aplicar um protótipo de equipamento de pesagem de pacientes, visando uma otimização do processo de hemodiálise. Para isso, foi elaborado um protótipo em CAD (*Design Auxiliado por Computador*), bem como simulação em CAE (*Engenharia Auxiliada por Computador*) antes da fabricação de um protótipo físico. Esse foi implementado na Clínica Nefrocor, onde teve seu funcionamento analisado em reunião com os *stakeholders*. Sua utilização se mostrou satisfatória, de forma a justificar a fabricação de mais unidades.

**PALAVRAS-CHAVE:** Projeto de Produto; Balança; Pesagem; Hemodiálise; Protótipo.

**ABSTRACT:** Mass scales are weighing equipment essential for an array of products and processes, as well as medicine in hemodialysis treatment. In this procedure, the patient's weight is critical for a correct dialysis prescription, along with the patient's liquid loss. This study aims to utilize Rozenfeld et al.'s (2006) Referential Model for Product Development Process to develop a prototype of an equipment for weighing patients, to continually control the liquid loss of patients throughout the hemodialysis procedure. To achieve that, a prototype was developed in CAD and its mechanical behavior was simulated in CAE before fabricating a functional prototype to be utilized in a dialysis clinic, and have its operation analyzed. The prototype produced satisfactory results that justified the production of further units.

**KEYWORDS:** Product Project; Mass Scale; Weighing; Hemodialysis; Prototype.

## INTRODUÇÃO

A Doença Renal Crônica (DRC) é a perda progressiva e irreversível das funções renais, de forma que os rins não

conseguem manter a homeostase metabólica e hidroeletrólítica do organismo (OLIVEIRA et. al., 2015; ROMÃO JUNIOR et. al., 2004). A DRC é um problema de saúde pública mundial, graças a alta taxa de incidência e prevalência. Estima-se que a prevalência da DRC seja de 7-10% dos adultos com mais de 30 anos, e de 23-36% em indivíduos acima de 64 anos, sendo que aproximadamente 4 milhões de pessoas ao redor do mundo necessitam de diálise (VERONESE et. al., 2019). Isso se deve principalmente ao aumento das doenças crônicas não transmissíveis, principalmente Hipertensão Arterial Sistêmica (HAS) e Diabetes Mellitus (DM), além de outros fatores como envelhecimento, obesidade, tabagismo e sedentarismo (OLIVEIRA et. al., 2015; VERONESE et. al., 2019).

O manejo do paciente com doença renal terminal é feito através de hemodiálise, diálise peritoneal ou transplante renal. Na hemodiálise convencional, o paciente é conectado a um equipamento que atua de forma similar aos rins, filtrando o sangue removendo metabólitos e líquidos, três vezes por semana, durante quatro horas. (OLIVEIRA, et. al., 2015; VERONESE et. al., 2019)

Para que o tratamento de hemodiálise seja efetivo, é de extrema importância realizar um rigoroso controle de líquido corporal, antes e depois de uma sessão de hemodiálise. Para a realização desse controle, deve ser realizada uma avaliação do paciente para se determinar seu peso-seco (pós-diálise) e seu peso-molhado (pré- diálise). A partir disso, o médico nefrologista irá prescrever a sessão de diálise com uma perda de líquido adequada à necessidade do paciente (DAUGIRDAS et. al., 2017). Atualmente, a forma utilizada de analisar a efetividade da diálise quanto a remoção de líquido, é realizando a pesagem do paciente antes e ao final da sessão em balanças convencionais.

Os pacientes portadores de insuficiência renal crônica que necessitam hemodiálise frequentemente apresentam restrições de mobilidade devido às doenças de base, bem como a evolução natural da doença. As causas mais comuns de DRC são HAS e DM, com incidência de 35% e 30%, respectivamente. Essas enfermidades têm como complicações, além da DRC, perda de visão, acidente vascular cerebral e amputações de membros (VERONESE et. al., 2019). Dessa forma, é recorrente que os pacientes necessitem auxílio dos técnicos de enfermagem para a locomoção até as balanças, e muitas vezes fazem o uso cadeiras de rodas, inclusive durante a pesagem. Ocorrem também, erros de pesagem quando esta é feita pelo próprio paciente, o que induz a prescrição inadequada de tratamento.

É proposta então, uma alternativa para avaliar a efetividade da remoção de líquido na sessão de diálise, na qual o paciente é pesado durante o tratamento, permitindo que o médico realize adequações na prescrição. A utilização desse método minimiza complicações interdialíticas e pós-dialíticas, como câibras, hipotensão, sobrecarga cardíaca e congestão, decorrentes de uma retirada de líquido inadequada (SANCHO et. al., 2013).

Para solução do problema, o estudo se propõe a aplicar a metodologia de Processo de Desenvolvimento de Produto (PDP) para desenvolver um protótipo de equipamento a ser utilizado na Clínica Nefrocor, uma clínica nefrológica especializada em hemodiálise,

localizada na cidade de Cachoeirinha, RS, que atende pacientes do Sistema Único de Saúde e principais convênios de saúde privados do estado. Como objetivo específico, o trabalho se propõe a avaliar a percepção dos envolvidos sobre a utilização do protótipo final desenvolvidos, visualizando se traz uma redução de erros de leitura de pesagem, um aumento na facilidade do processo de pesagem e um aumento na qualidade e efetividade do tratamento dialítico.

Para o desenvolvimento do equipamento, foi utilizado o Modelo Referencial de Processo de Desenvolvimento de Produto (PDP) de Rozenfeld et al. (2006). Esse é composto por três macro fases: Pré-projeto, Desenvolvimento e Pós-projeto. Para o projeto do protótipo foi utilizada a ferramenta CAD (*Computer Aided Design, ou Desenho Assistido por Computador*). Essa ferramenta, é considerada como uma das mais importantes ferramentas utilizadas no PDP no cenário atual (AZEMI et. al., 2018). Após validação do protótipo em CAD, foi fabricado um protótipo funcional para avaliação da técnica *in situ*.

O problema a ser resolvido não é um problema exclusivo da Clínica Nefrocor; é um problema relatado em diversos centros de diálise ao redor do mundo. Dessa forma, caso o projeto seja realizado com sucesso, esse visa ser patenteado e estudado a possibilidade de iniciar produção para a venda de unidades para a Nefrocor e para outros estabelecimentos de saúde que se mostrarem interessadas em adquirir o equipamento desenvolvido.

O trabalho está delimitado temporalmente em um período de seis meses, entre janeiro e junho de 2022. Durante esse período, foi realizada a parte teórica, o desenvolvimento do protótipo, os testes do protótipo e a avaliação de sua utilização.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção são abordados conhecimentos e aspectos sobre equipamentos de pesagem, soluções existentes para a pesagem de objetos e de pacientes, o histórico e evolução de equipamentos de pesagem, bem como suas formas de utilização e sua calibração. As balanças e equipamentos de pesagem são utilizados pela indústria, comércio e medicina há séculos, e são de importância fundamental para diversos processos, produtos e procedimentos. Elas garantem não apenas a precisão, mas também possibilitam a existência de diversos processos e produtos.

A balança mecânica de dois pratos foi o primeiro instrumento de medição criado pelo homem, e é usada há aproximadamente quatro mil anos. Esta utiliza a comparação entre a massa de um objeto conhecido para determinar a massa de outro objeto. É baseada nos princípios de uma alavanca e o equilíbrio de momentos de inércia, em que uma haste oscilante se movimenta em frente de uma escala graduada. Para que se faça a pesagem de um objeto em uma balança de dois pratos, deve ser colocado em um dos pratos o objeto a ser pesado, e em outro prato são colocados pesos de massa conhecida, até que se alcance o equilíbrio entre os dois lados da balança (AFONSO, 2004).

A evolução dos equipamentos de medição de massa fez com que as balanças de dois pratos fossem sendo fabricadas de materiais mais leves e mais resistentes, de forma que pudessem ser mais facilmente transportadas. O uso de diferentes metais possibilitou também que novos métodos de fabricação fossem utilizados, permitindo configurações diferentes de apoio do braço de alavanca, de forma que as balanças puderam ter um aumento de sensibilidade, trazendo resultados mais fidedignos (JENSEN, 1965).

Por volta de 1870, o alemão Florenz Sartorius desenvolveu um equipamento que revolucionou mundo das balanças; a primeira utilização de uma balança enclausurada em uma caixa de vidro, montada na própria estrutura da balança. Essa característica, bem como a utilização de alumínio para sua construção e braços de alavanca pequenos, trouxeram ganhos de precisão não vistos desde a criação da primeira balança de dois pratos. Esse modelo introduzido pelo alemão passou a ser o modelo de referência, e foi adotado amplamente no mercado. Foi o principal modelo utilizado, até ser substituída no século XX (AFONSO, 2004).

A partir do século XX, o modelo “cavaleiro” passou a ser muito utilizado por ser uma balança que dispensava o uso de pesos demasiadamente pequenos. Ainda assim, as balanças que utilizavam este sistema conseguiam detectar variações de massa na casa de 0,0001 grama. Essas balanças empregavam um sistema de apoio em 3 pontos, reduzindo assim erros de pesagem por vibrações no ambiente (AFONSO, 2004; JENSEN, 1965).

A próxima evolução no mercado das balanças foi o desenvolvimento das balanças de um prato, ou eletromecânicas. Essas foram amplamente adotadas, apesar de seu custo de fabricação mais elevado do que as balanças puramente mecânicas. Ela utiliza, ao invés de um prato com pesos gabaritados, contrapesos suspensos. Quando um objeto é posicionado no prato para ser pesado, os contrapesos são retirados de seu eixo para que o contrapeso tenha a mesma massa que o objeto a ser pesado. Esse mecanismo é atuado por um botão, de forma que essa seja a única interação do utilizador com a balança (AFONSO, 2004).

Desde 1946, são utilizadas majoritariamente as balanças eletrônicas, que já têm custos de fabricação bastante competitivos, e têm probabilidades de falhas mecânicas muito menores do que as balanças puramente mecânicas, além de serem menos sensíveis a vibrações mecânicas durante a medição. Seu princípio de funcionamento é baseado em uma bobina e um ímã. Ao colocar um objeto sobre o prato de medição, o ímã é deslocado através da bobina causando uma alteração no campo eletromagnético dessa, gerando uma corrente elétrica interpretada por um microprocessador. Esse, mostrará o valor na escala selecionada, referente à corrente que foi gerada.

Por sua facilidade de uso e sua grande precisão, as balanças eletrônicas são as mais usadas em linhas de fabricação, consultórios médicos e hospitais (AFONSO, 2004). Um resumo da evolução das balanças pode ser visualizado na Figura 1.

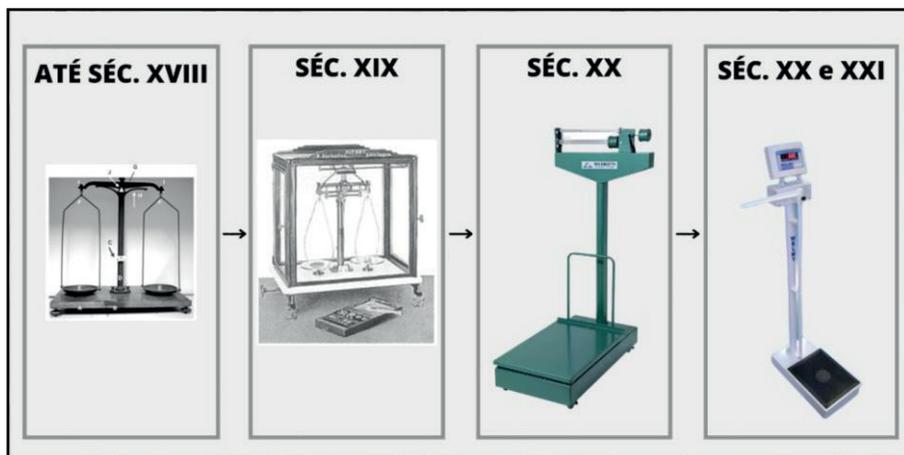


Figura 1: Linha do tempo com balanças representativas de cada grupo de equipamento descrito.

Estas balanças eletrônicas utilizam poucos componentes para funcionamento, ao contrário das antigas balanças mecânicas, reduzindo assim o desgaste mecânico e probabilidades de falhas. As balanças atualmente são compostas, em geral, por uma plataforma sobre a qual se coloca o objeto a ser pesado; uma célula de carga; e um sistema eletrônico de aquisição e display de dados. A utilização é extremamente simples, havendo apenas botões de liga/desliga e zeragem, deixando a utilização mais acessível para qualquer usuário (AFONSO, 2004).

Os componentes das balanças atuais podem ser comprados prontos, de forma que precisam apenas ser instalados e calibrados. Alguns destes componentes estão apresentados na Figura 2. Ainda assim, existe muito espaço no mercado para se fazer inovação utilizando esses módulos de componentes pré-prontos, dispensando assim fabricá-los do zero. Isso reduz o custo de fabricação e desenvolvimento de produtos, melhorando a atratividade do valor final.

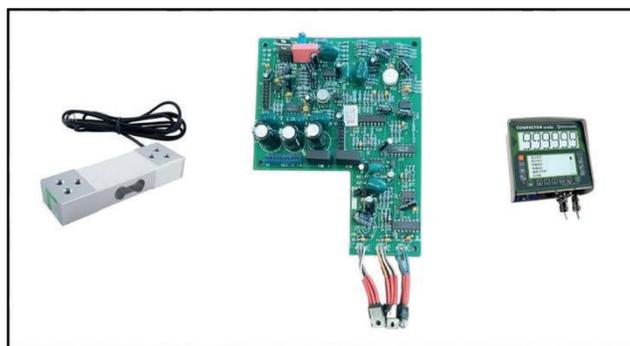


Figura 2: Célula de carga, sistema embarcado de aquisição de dados e display de LCD

Como qualquer equipamento de medição, as balanças também estão sujeitas a perderem sua calibração à medida que são utilizadas. Desse modo, para que apresentem o melhor desempenho, devem passar pelo processo de calibração periodicamente. Esse processo se dá através da utilização de pesos-padrão para a verificação dos erros de leitura do equipamento. Assim, o INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) regulamenta não só a fabricação, mas também a utilização, manutenção e calibração de balanças, atualmente através da Portaria 236/1994.



Figura 3: Exemplo de pesos-padrão utilizados para calibração de balanças.

Cada equipamento possui uma classificação, que irá influenciar o erro máximo permitido na leitura de um peso-padrão, ilustrados na Figura 3, e estão divididos em 7 classes distintas: E1, E2, F1, F2, M1, M2 e M3, cada um com seus erros máximos permissíveis conforme a Tabela 1. A classe E1 é a que apresenta a maior exatidão nas médias, e a M3 é a que apresenta os valores menos precisos (CAMPOS, 2013).

É importante saber utilizar as classes de pesos-padrão corretas quando se está realizando a calibração de um equipamento, pois se for selecionado uma classe incorreta, pode se tornar impossível de detectar o erro, ou de classificar se o erro de medição encontrado é da balança ou do peso-padrão utilizado (CAMPOS, 2013).

Erros Máximos Permitidos (+- em mg)							
Valor Nominal	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>
50 kg	25	75	250	750	2.500	7.500	25.000
20 kg	10	30	100	300	1.000	3.000	10.000
10 kg	5	15	50	150	500	1.500	5.000
5 kg	2,5	7,5	25	75	250	750	2.500
2 kg	1	3	10	30	100	300	1.000
1 kg	0,5	1,5	5	15	50	150	500
500 g	0,25	0,75	2,5	7,5	25	75	250
200 g	0,1	0,3	1	3	10	30	100
100 g	0,05	0,15	0,5	1,5	5	15	50
50 g	0,03	0,1	0,3	1	3	10	30
20 g	0,025	0,08	0,25	0,8	2,5	8	25
10 g	0,02	0,06	0,2	0,6	2	6	20
5 g	0,015	0,05	0,15	0,5	1,5	5	15
2 g	0,012	0,04	0,12	0,4	1,2	4	12
1 g	0,01	0,03	0,1	0,3	1	3	10
500 mg	0,008	0,025	0,08	0,25	0,8	2,5	
200 mg	0,006	0,02	0,06	0,2	0,6	2	
100 mg	0,005	0,015	0,05	0,15	0,5	1,5	
50 mg	0,004	0,012	0,04	0,12	0,4		
20 mg	0,003	0,01	0,03	0,1	0,3		
10 mg	0,002	0,008	0,025	0,08	0,25		
5 mg	0,002	0,006	0,02	0,06	0,2		
2 mg	0,002	0,006	0,02	0,06	0,2		
1 mg	0,002	0,006	0,02	0,06	0,2		

Tabela 1: Tabela representativa de erros máximos permitidos por classe de equipamento

Fonte: <https://blog.labstore.com.br/peso-padroao/>

## MATERIAIS E MÉTODO

Este estudo visa a aplicar a metodologia desenvolvida e descrita por Rozenfeld et al. (2006) para fabricar um protótipo de equipamento de pesagem para pacientes de hemodiálise. Serão descritas todas as etapas do desenvolvimento do projeto, bem como os marcos que deverão ser atingidos ao final de cada etapa, de forma a liberar o desenvolvimento para a etapa seguinte. Na Figura 4, estão expostas as quatro principais etapas do método utilizado, bem como suas principais características. As etapas são abordadas e expostas individualmente.



Figura 4: Quadro descritivo das etapas de desenvolvimento.

## Pré-desenvolvimento - Preparação

A primeira etapa do desenvolvimento do produto envolve a compreensão do problema a ser resolvido, de forma a definir critérios do produto que devem ser atendidos para que seja desenvolvido um protótipo adequado. Para que essa fase inicial de planejamento de um produto seja realizada com sucesso, o escopo do produto, as necessidades para seu desenvolvimento (tempo, custo e pessoal) devem ser definidas e detalhadas. A partir dessas informações, é decidida a atratividade do projeto, para se definir se ele será desenvolvido ou não. Esta etapa do processo não gera ganho capital direto para o cliente; é uma fase de definições e planejamento somente (ROZENFELD et.al. 2006).

O pré-desenvolvimento de um projeto é baseado em definir seu escopo e o escopo do produto, as atividades realizadas e o cronograma de desenvolvimento, os critérios de avaliação do sucesso ou fracasso do produto, bem como sua qualidade. A minuta do projeto é definida como a documentação que combina as premissas e os elementos necessários no projeto para que ele seja bem-sucedido, e para que seja de fato utilizado (ROZENFELD et. al., 2006).

## Desenvolvimento - Geração

A segunda macro fase do desenvolvimento de produto seguindo a metodologia desenvolvida por Rozenfeld et al. (2006) é a de desenvolvimento, abrangendo: Projeto Informacional, Projeto Conceitual, Projeto Detalhado, Preparação para Produção e Lançamento do Produto. As fases aplicáveis ao desenvolvimento do projeto deste artigo serão descritas a seguir.

Para que uma fase seja definida como concluída, um *Gate* (objetivo) previamente determinado deve ser atingido. Esses objetivos podem ser entregáveis que devem ser avaliados, de forma a validar a etapa realizada e preparar a equipe de desenvolvimento para a etapa a seguir.

O objetivo geral dessa macro fase do PDP é gerar especificações que deverão ser atendidas pelo protótipo e conseqüentemente, pelo produto. Essas especificações vão desde as requisições do cliente (estéticas, dimensões, funcionamento), até normas técnicas que devem ser atendidas e se existem produtos similares no mercado (ROZENFELD et.al. 2006).

## Projeto informacional

Partindo das informações coletadas na etapa anterior, de planejamento, será desenvolvido um conjunto de especificações para que o produto seja desenvolvido com sucesso. Essas especificações são utilizadas ao longo do desenvolvimento do projeto para gerar soluções, para desenvolver ideias e servir de parâmetro de avaliação do sucesso do protótipo. É importante entender plenamente o problema que se deseja resolver, de forma que será necessário aprofundar todas as informações que foram previamente coletadas. Caso as informações que foram levantadas sejam incorretas ou desviem do problema a ser resolvido, pode ser desenvolvido um projeto que não soluciona o problema inicial (ROZENFELD et.al. 2006)

Foi realizada também, uma busca e análise sobre as tecnologias a serem utilizadas para o desenvolvimento em bancos de patentes e normas regulatórias. Essa etapa mostra-se particularmente importante, pois é nela que se descobre métodos de fabricação que podem ser utilizados, e se já existem produtos similares no mercado, de forma a não ferir nenhuma patente.

Os requisitos do produto foram definidos em conjunto com os *stakeholders* (partes interessadas no projeto), sendo esses os 5 colaboradores da linha de frente da referida clínica de hemodiálise de interesse na solução, sendo técnicos de enfermagem, enfermeiros e médicos. Já as especificações-meta foram desenvolvidas pelo próprio autor a partir de sua interpretação dos requisitos. As especificações-meta do produto devem ser comparadas com os requisitos de projeto, para garantir que estas irão sanar o problema que foi proposto para resolução. Se estiverem de acordo, a próxima etapa do desenvolvimento poderá ser iniciada (ROZENFELD et. al., 2006).

## Projeto conceitual

A seguinte fase do desenvolvimento do produto é a de geração de ideias através de *brainstorming* (técnica de geração de ideias). Este, serve para elaborar novas ideias sobre como solucionar o problema, sem julgá-las como factíveis ou não, pois a intenção desta etapa é elaborar o maior número possível de ideias. Após a conclusão do *brainstorming*, as ideias geradas devem ser discutidas, classificadas e agrupadas (ROZENFELD et. al., 2006).

Seguindo o processo, deve ser criada uma matriz morfológica, *Morph Chart*, utilizando as ideias geradas, e agrupando-as em categorias dependentes de seus atributos ou suas funções específicas. A Matriz Morfológica oferece uma forma estruturada para abordar a geração de conceitos completos para um problema bem- definido. Ela faz isso de forma visual e explorando diversas combinações com as ideias obtidas através do *brainstorming*, de forma a obter a melhor funcionalidade (ROZENFELD et. al., 2006).

Para fazer a determinação de qual é a configuração que será levada adiante no desenvolvimento, deve ser realizada a *Pugh Screening e Scoring* (Análise e Ranqueamento pelo método PUGH). Essa metodologia serve para comparar os conceitos de solução que foram elaboradas com o sistema que é utilizado atualmente. Para isso, é atribuído um sistema de pesos para cada uma das requisições do projeto, de forma criar um *ranking* as soluções. A solução com a maior pontuação será a escolhida para ser desenvolvida e detalhada, de forma que será testada em forma de protótipo (ROZENFELD et.al., 2006).

Ao fazer essa pontuação e *ranking* dos conceitos, somente um deles é levado adiante, de forma que será prototipado e terá sua utilização analisada e avaliada. Neste estudo o *brainstorming* e a organização da Morfológica acabou sendo desenvolvido pelo autor junto a um técnico graduado em automação. Já a atribuição de valores de Pugh foi por escolha do próprio autor.

## Projeto detalhado

Na fase do projeto detalhado do desenvolvimento de um produto, já foram determinados os componentes, os sistemas e subsistemas que devem ser implementados, faltando apenas o detalhamento das formas de viabilizar e tangibilizar as especificações. Ao final da fase do projeto detalhado, o entregável que permitirá a passagem para a próxima etapa é, portanto, o protótipo funcional, o qual deverá ter sido aprovado pela equipe (ROZENFELD et.al., 2006).

O croqui feito a mão é um recurso frequentemente utilizado em desenvolvimento de produtos para iniciar o desenvolvimento do protótipo, e realizar a primeira representação visual de como será o produto. O croqui serve como base para desenvolver o protótipo em CAD. Devido ao grande uso de ferramentas como *CAD*, torna-se mais direta a etapa de desenvolvimento do protótipo, pois permite um maior dinamismo nas alterações do projeto.

Isso ocorre pela fluidez e facilidade de gerar alterações em um protótipo em *CAD*, de forma que se possa adaptar o projeto às realidades de produção à medida que o projeto avança, assim como adaptar o projeto a novos requisitos que possam surgir. Além disso, a utilização de simulação em *CAE* (*Engenharia Auxiliada por Computador*) adiciona mais uma etapa no desenvolvimento, mas permite que sejam reduzidas as falhas de produção e utilização do produto, uma vez que seu comportamento mecânico é extensamente analisado (AZEMI et. al., 2018). Tal projeto de *CAD* e *CAE* foi desenvolvido pelo próprio autor, já utilizando a matéria-prima selecionada para o projeto, servindo como uma etapa de validação. Por fim, foi realizado pelo autor uma avaliação da percepção de ganho obtida com a adoção do sistema, de forma a determinar os aspectos positivos e negativos do projeto.

## MÉTODO

Foi utilizada a metodologia desenvolvida por Rozenfeld et. al (2006) para realizar o desenvolvimento de um sistema de pesagem de pacientes de hemodiálise para a Clínica Nefrocor. A metodologia, descrita nas seções 3.1 e 3.2, foi cumprida em sua integralidade. Para o desenvolvimento do projeto, foi desenvolvido um croqui feito à mão, um protótipo feito em *CAD*, bem como um protótipo físico, que foi aplicado na empresa mencionada.

## RESULTADOS

### Resultado do pré-desenvolvimento

Em conversa com médicos da Clínica Nefrocor, foi constatado um problema recorrente nas clínicas de diálise, o qual consiste em o paciente precisar se levantar no final da sessão de hemodiálise, ir se pesar e conversar com o enfermeiro para ser liberado. Esse procedimento é amplamente adotado, porém acarreta riscos para o paciente e erros de pesagem, de forma que não se obtém as melhores métricas para avaliação da efetividade da diálise, tratando de perda de líquido; além de acarretar filas para pesagem e morosidade para a liberação dos pacientes. Logo, é uma problemática que afeta a eficiência do procedimento, pois no procedimento de hemodiálise cada paciente tem uma máquina de HD para utilização, e podem ter até 36 pacientes dialisando simultaneamente na mesma sala.

Também foi constatado que a diálise pode ser considerada um procedimento engessado, por não haver hoje uma maneira metodológica direta de avaliar se o procedimento está tendo o efeito desejado antes de seu término, portanto permitindo poucas adaptações e ajustes personalizadas pela resposta dos pacientes as condições configuradas no equipamento ao longo das aproximadamente quatro horas ao qual está realizando a hemodiálise. Neste sentido, é inviabilizado o monitoramento em tempo real do indicador de eficácia.

Foi discutida então que o escopo do projeto seria resolver ambos os problemas com uma solução só. Assim, foi organizada a minuta de abertura do projeto indicando o escopo de resolução de problema e demais definições. A minuta está apresentada na Figura 5.

<b>Empresa / Órgão / Setor/ Programa:</b> Clínica Nefrocor						
<b>Gerente do projeto:</b> Técnico de Manutenção dos Equipamentos						
<b>Elaborado por:</b> Técnico de Manutenção dos Equipamentos					<b>Versão:</b> 1.0	
<b>Escopo do Projeto</b>						
Solução passível de realizar a pesagem do paciente durante toda a sessão de diálise, para que se possa avaliar a perda de líquido em tempo real (ganho de eficácia), e para que, no final da sessão, o paciente não precise levantar-se para se pesar (ganho de eficiência).						
<b>Período</b>				<b>Envolvidos</b>		
	J	F	M	A	M	J
Pré-desenvolvimento	■	■				
Projeto Informacional			■			
Projeto Conceitual				■	■	
Projeto Detalhado					■	■
				<ul style="list-style-type: none"> <li>- Médica – 26 anos de experiência na área</li> <li>- Enfermeiro – 23 anos de experiência, atua 10 turnos por semana</li> <li>- Técnicos de Enfermagem – atuam 6 turnos por semana</li> </ul>		
<b>CrITÉRIOS de Aceitação</b>				<b>Restrições</b>		
Para avançar em cada etapa as validações ocorreram com apoio da orientadora do projeto aferido sobre o andamento; Conferência com stakeholders para aprovações de passagem de etapas.				<ul style="list-style-type: none"> <li>- Questões de custos não estão incorporados;</li> <li>- Possibilidade de conectividade</li> </ul>		

Figura 5: Minuta de projeto.

## RESULTADOS DO DESENVOLVIMENTO

### Resultados do projeto informacional

Em entrevista com os *stakeholders* foi possível delimitar os problemas mais comuns ao se utilizar o sistema atualmente empregado. Nessa conversa foram definidos alguns critérios que devem ser atendidos para que o produto possa atender os pacientes da melhor forma possível, e que facilite o trabalho dos enfermeiros e técnicos de enfermagem, que são os responsáveis por monitorar a diálise e auxiliar o paciente.

A partir destas informações, é possível avançar o projeto para a próxima etapa, a de desenvolvimento do projeto. Alguns requisitos foram trazidos como: determinar um custo máximo para o protótipo; a necessidade de acoplar o protótipo às poltronas já utilizadas hoje para a diálise; reduzir o tempo de pesagem dos pacientes; não colocar o paciente em risco com o equipamento e suportar cargas de até 180kg. Na Tabela 2, é possível encontrar a lista consolidada dos requisitos de projeto, com identificador, descrição, especificação -meta.

Identificação	Descrição	Especificação	Origem	Flexibilidade de Cumprimento
R1	Fácil de usar e movimentar	Uma pessoa faça a movimentação	Gestão, Limpeza	Obrigatório
R2	Baixa manutenção	Mesma manutenção de outras balanças	Gestão, Serviços Gerais	Opcional
R3	Custo Baixo	Abaixo de R\$2.000,00	Gestão,	Obrigatório
R4	Resistente à limpeza	Resistir à hipoclorito	Limpeza, Serviços Gerais	Opcional
R5	Compatível com as poltronas utilizadas	HERVALHT3705; Medidas da base: 460mm x 540mm	Gestão	Obrigatório
R6	Manter a altura do assento da poltrona dentro da norma	Entre 550mm e 850mm	Gestão	Obrigatório

Tabela 2: Tabela de Requisitos de projeto.

Com estas informações, foi realizada uma pesquisa em banco de patentes para determinar se existe algum produto que cumpra o que foi requisitado do projeto, e não foi encontrado nenhum. Para tal etapa, foi realizada pesquisa no Instituto Nacional da Propriedade Industrial, utilizando as palavras-chave: pesagem de pacientes, balança, hemodiálise. No dia 17/06/2022 foi realizada a mesma pesquisa, e novamente não foram encontradas soluções existentes. Assim, o desenvolvimento do projeto pode ser continuado.

## Resultados do projeto conceitual

Foi realizado uma sessão de *brainstorming* para determinar ideias de funcionamento do equipamento, de componentes a serem utilizados e formas de utilização do equipamento. Após o término do *brainstorming*, as ideias geradas foram analisadas e avaliadas, para determinar a viabilidade de utilização delas. As ideias que se mostraram mais promissoras, foram separadas em grupos, de acordo com o sistema da qual fazem parte.

Tendo em mãos as requisições do cliente para o produto, é possível iniciar o processo de geração de ideias e classificação delas. Esse processo foi realizado utilizando a técnica de *Morph Chart*, ou matriz morfológica, que permitiu o agrupamento de possíveis soluções de acordo com o sistema do qual fazem parte – foram organizados em 6 sistemas – aferição, leitura, fixação, energia, material e acabamento. A seguir, na Tabela 3 é possível encontrar a tabela com as alternativas de ideias agrupadas.

	Aferição	Leitura	Fixação	Energia	Material	Acabamento
1	1x Célula de Carga 	Display LCD 	Base removível	Bateria 	Aço Inoxidável	Galvanização 
2	4x Células de Carga 	Conexão com Computador 	Base fixa na poltrona	Rede Elétrica 	Alumínio	Pintura Eletrostática 
3	Adaptar sistema de aferição de outra balança	Conexão por aplicativo 	Fixação na furação existente		Polímero	Pintura Martelada 
4	Sistema mecânico 	Escala Analítica 			Aço Carbono	Sem acabamento

Tabela 3: Ideias agrupadas a partir do Brainstorming

Partindo das ideias agrupadas, foram elaborados conceitos de soluções completas, utilizando uma ideia de cada agrupamento da tabela anterior. Foram elaborados diversos conceitos diferentes, mas após análise de viabilidade, foram selecionados 3 conceitos para serem analisados em maior profundidade. Esses 3 conceitos estão expostos na Tabela 4. Os elementos que envolvem a interatividade por meio de conexões são os que apresentam maior variação entre os conceitos, uma vez que existem diversas opções de conectividade que podem ser utilizadas no produto, dependendo das necessidades.

Conceito 1	Conceito 2	Conceito 3
1 Célula de Carga 	4x Células de Carga 	Sistema adaptado de outra balança
Conexão com Computador 	Conexão por aplicativo 	Display de LCD 
Base removível	Base fixa na poltrona	Base fixa na poltrona
Rede Elétrica 	Bateria 	Rede Elétrica 
Alumínio	Aço Inoxidável	Aço Carbono
Sem Acabamento	Pintura Martelada	Pintura Eletrostática

Tabela 4: Detalhamento dos conceitos gerados

A partir dos conceitos foram encontradas diversas configurações que podem ser soluções para o problema que se está tentando solucionar. Eles então foram levados para a próxima etapa, que é a *PUGH SCREENING & SCORING*.

Para a construção da Tabela *PUGH*, Tabela 5, foram utilizados os requisitos de projeto previamente determinados, além de uma pontuação atribuída a cada um. Essa pontuação é determinada de acordo com a importância que cada um dos requisitos tem no produto, definido pelo próprio autor a partir do que foi interpretado juntos aos stakeholders.

A partir dessa pontuação, cada um dos conceitos é avaliado em “+”, “-” ou “0”, se for superior, inferior ou igual ao conceito de referência, que nesse caso é o procedimento utilizado hoje para pesagem dos pacientes. No final, a pontuação de cada conceito é somada, para que seja definido qual dos conceitos será desenvolvido na próxima etapa.

Requisito de Projeto	Pontuação	Conceito 1	Conceito 2	Conceito 3
R1: Facilidade de Uso	2	0	0	2
R2: Baixa Manutenção	2	0	-2	2
R3: Precisão	1	1	1	1
R4: Custo de Fabricação	1	-1	-1	0
R5: Resistência à limpeza	2	2	2	2
Total	8	2	0	7

Tabela 5: Tabela PUGH de ranking de conceitos.

Aplicando o método de análise de conceitos *PUGH*, como visto na Tabela 5, foi possível chegar à conclusão que o conceito 3 é o mais adequado à realidade da empresa em que o produto será utilizado. O conceito 1 não foi selecionado por necessitar um computador para cada sistema, de forma a deixar inviável sua utilização. Já o conceito 2, não foi satisfatório por ser difícil de fazer a calibração de 4 células de carga simultaneamente, e seria um sistema caro de implementar. Também, foi descartado pela dificuldade de implementar um sistema por aplicativo em celular.

Dessa forma, o conceito selecionado para desenvolvimento é composto por um sistema de medição adaptado de uma balança comercial, com um *display* de LCD para fácil leitura dos resultados, fixado na base das poltronas, alimentado por fonte 12V e bivolt (110V/220V), será fabricado em aço carbono 1020 e apresentará pintura. Após esse processo de criação dos conceitos completos, foi realizada uma reunião de conferência com os *stakeholders*, de forma a validar os conceitos e as ideias que foram empregadas. A visão do cliente e do usuário durante o desenvolvimento é crítico para que se elabore um produto que atenda as demandas e que seja de fato utilizado. Durante essa reunião, foi confirmado que o projeto desenvolvido até essa etapa apresenta potencial para resolver o problema existente, e o desenvolvimento foi liberado para prosseguir para a próxima etapa.

## RESULTADO DO PROJETO DETALHADO

De acordo com a etapa anterior, ficou definido que o conceito a ser levado adiante para ser desenvolvido e aprofundado consiste em adaptar um sistema de aferição já existente, sendo este alimentado pela rede elétrica da clínica, o protótipo será fabricado em aço carbono 1020, será fixado na estrutura já existente das poltronas, de forma a manter a mobilidade delas, e contará com uma tela de *LCD* para a leitura dos resultados da medição. Devido a facilidade de fabricação e manutenção, o protótipo será composto por uma base plana, que será fixada a estrutura da poltrona, e na base serão fixados os outros componente. Para a definição da estrutura básica do equipamento, foi realizado um croqui feito à mão – Vide Figura 5.

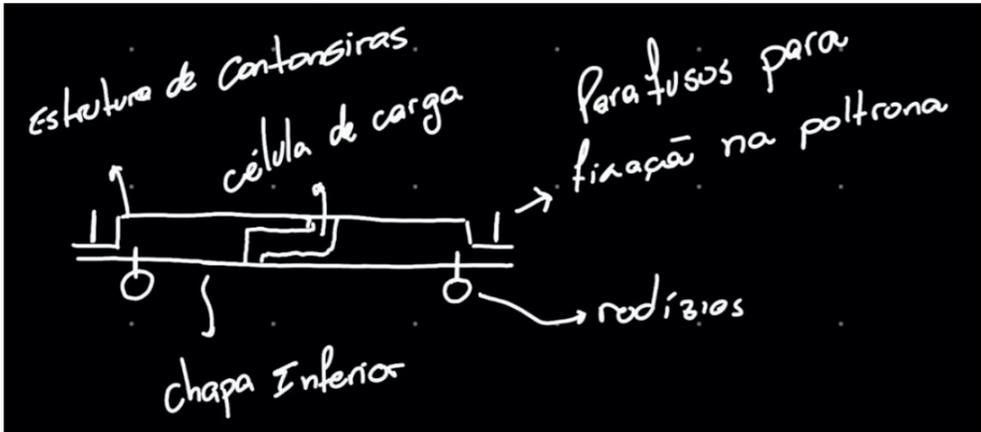


Figura 6: Croqui feito à mão, representando a vista lateral da estrutura do equipamento.

Após a definição básica da estrutura, foi iniciado o projeto em *CAD*, para estudar a viabilidade do protótipo. Ao finalizar o projeto em *CAD*, é realizado um estudo em *CAE*, de forma a validar a resistência do equipamento.

O material selecionado para o protótipo foi aço carbono 1020 e tem propriedades mecânicas conforme a Tabela 6. Esse material foi selecionado pois apresenta propriedades mecânicas compatíveis com as necessidades do projeto, apresenta boa soldabilidade e tem custo de aquisição compatível com o orçamento.

Propriedades mecânicas dos aços nas condições: laminados a quente: normalizado e recozido.									
Qualidade		Condições	Temperatura de austemização (°C)	Resist. à tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)	Redução de área (%)	Dureza (HB)	Impacto (J)
AFP	AISI (1)								
1015	1015	Laminado	-	420	315	39,0	61	126	111
		Normalizado	925	425	325	37,0	70	121	115
		Recozido	870	385	285	37,0	70	111	115
1020	1020	Laminado	-	450	330	36,0	59	143	87
		Normalizado	870	440	345	35,8	68	131	118
		Recozido	870	395	295	36,5	66	111	123

Tabela 6: Propriedades mecânicas dos aços 1015 e 1020, nas condições de laminado, normalizado e recozido.

Fonte: Catálogo FG Steel, disponível em: <http://lgsteel.com.br/propriedades-mecanicas-do-carbono.htm>

Após a chapa inferior ser validada, o processo de desenvolvimento seguiu com o projeto da base. Esse, utiliza cantoneiras de abas iguais no mesmo material, aço carbono 1020 nas dimensões 3/16" x 1.1/4". Na Tabela 7 é possível encontrar o catálogo de dimensões disponíveis de cantoneiras de abas iguais.

Bitola	Peso teórico kg/m	Bitola	Peso teórico kg/m	Bitola	Peso teórico kg/m	Bitola	Peso teórico kg/m
1/8 x 1/2"	0,55	3/16 x 1.3/4"	3,15	1/4 x 4"	9,81	3/8 x 6"	22,20
1/8 x 5/8"	0,71	3/16 x 2"	3,63	5/16 x 2"	5,83	1/2 x 3"	13,90
1/8 x 3/4"	0,87	3/16 x 2.1/2"	4,52	5/16 x 2.1/2"	7,44	1/2 x 4"	19,05
1/8 x 7/8"	1,04	3/16 x 3"	5,52	5/16 x 3"	9,07	1/2 x 5"	24,10
1/8 x 1"	1,19	1/4 x 1"	2,29	5/16 x 3.1/2"	10,70	1/2 x 6"	29,20
1/8 x 1.1/4"	1,50	1/4 x 1.1/4"	2,86	5/16 x 4"	12,19	5/8 x 4"	23,42
1/8 x 1.1/2"	1,83	1/4 x 1.1/2"	3,48	3/8 x 2"	6,99	5/8 x 5"	29,80
1/8 x 1.3/4"	2,14	1/4 x 1.3/4"	4,12	3/8 x 2.1/2"	8,78	5/8 x 6"	36,00
1/8 x 2"	2,46	1/4 x 2"	4,75	3/8 x 3"	10,72	5/8 x 8"	48,78
3/16 x 1"	1,73	1/4 x 2.1/2"	6,10	3/8 x 3.1/2"	12,50	3/4 x 5"	35,10
3/16 x 1.1/4"	2,20	1/4 x 3"	7,30	3/8 x 4"	14,58	3/4 x 6"	42,70
3/16 x 1.1/2"	2,68	1/4 x 3.1/2"	8,63	3/8 x 5"	18,30	3/4 x 8"	57,80

Tabela 7: Catálogo de dimensões de cantoneiras de abas iguais.

Fonte: Catálogo Aços Riograndense, disponível em: <https://www.acosriograndense.com.br/cópia-tabela-barras-chata-1>

Após a pré-seleção dos materiais a serem utilizados, o equipamento deve ser projetado em CAD e simulado em CAE, de forma a validar a seleção dos materiais.

## Protótipo em CAD

Para a realização do protótipo em CAD, foi utilizado o software AUTODESK INVENTOR 2022, utilizando uma licença de estudante obtida através da PUCRS. Ao iniciar a prototipagem, os componentes de pesagem e os componentes eletrônicos foram medidos, bem como as poltronas utilizadas na Clínica Nefrocor. Essa etapa foi realizada para garantir a compatibilidade entre todos os componentes. O desenho em CAD está representado na Figura 7.

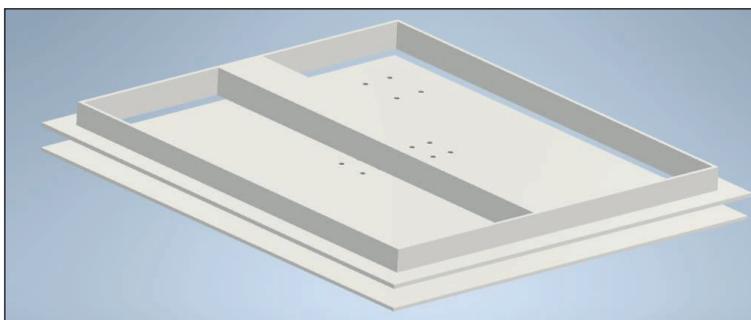


Figura 7: Protótipo em CAD realizado no software AUTODESK INVENTOR 2022.

Foram realizados projetos de cada um dos componentes que fazem parte do protótipo, sendo eles: chapa inferior, base superior fabricada com cantoneiras, travessas de fixação da célula de carga e sistema de fixação dos rodízios.

A chapa inferior metálica de aço 1020 que serve como base e ponto de fixação da célula de carga e dos rodízios foi projetada e foi realizada análise em CAE. Conforme a Figura 8 a seguir, foi possível determinar que a chapa na espessura de 3mm não seria suficiente para suportar a carga de 180 kg determinada no projeto (160kg do paciente + 20kg da poltrona e equipamento).

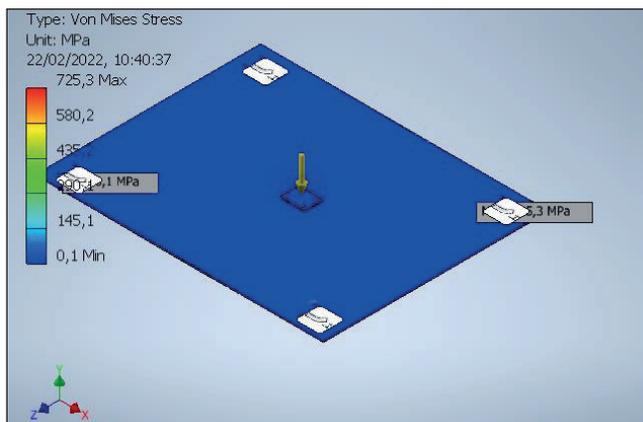


Figura 8: Simulação CAE da chapa inferior de aço 1020 com 3mm de espessura, tensão máxima de 725,3 MPa.

A simulação mostrou que a chapa estaria sujeita a tensões na ordem de 725 MPa, muito acima da tensão de escoamento do material. Os pontos que apresentaram acúmulos de tensão se deram nos pontos de furação para fixação da célula de carga e rodízios. Dessa forma, a espessura da chapa foi aumentada para 4mm, e o posicionamento dos rodízios foi alterado, mais para o centro da chapa, de forma a distribuir melhor o carregamento. Foi realizado novamente a simulação, e dessa vez os resultados foram satisfatórios para que o equipamento suporte as cargas determinadas para o projeto. Os resultados da nova simulação estão na Figura 9.

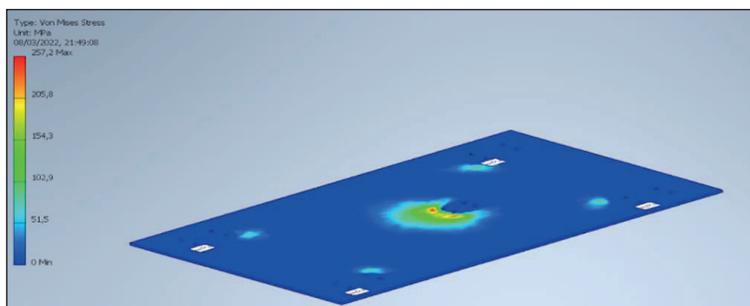


Figura 9: Simulação da chapa inferior de aço 1020 com espessura de 4mm.

Após a chapa inferior ser validada, o processo de desenvolvimento seguiu com o projeto da base. Esse, utiliza cantoneiras de abas iguais no mesmo material, aço carbono 1020 nas dimensões 3/16" x 1.1/4". Para a união das cantoneiras em forma de retângulo, serão realizadas soldas na extensão total da face de contato entre as peças. Para a fixação da célula de carga, serão utilizados oito parafusos milimétricos, fixados à chapa inferior e estrutura superior. A soldagem, realizada de forma correta, garante que as peças soldadas se comportem da mesma forma que uma peça única. A mesma simulação em CAE foi utilizado para prever o comportamento do componente, demonstrando que o dimensionamento estava correto.

A Figura 10 é o resultado da simulação da estrutura superior, e mostra que a tensão máxima no componente é na ordem de 126,8 MPa, bastante abaixo da tensão de escoamento do material, conforme Tabela 6. Dessa forma, o componente está corretamente dimensionado, e resistirá às tensões necessárias.

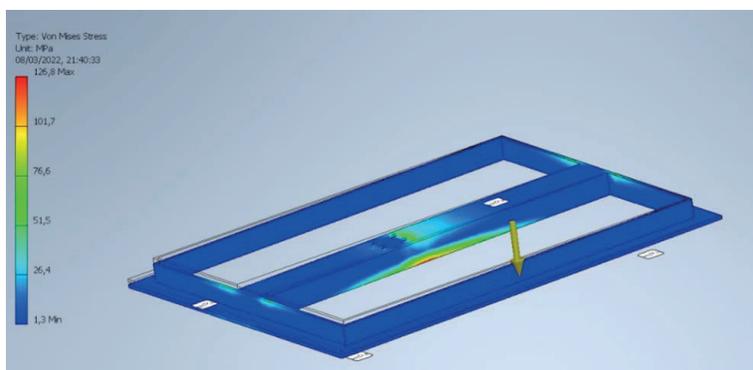


Figura 10: Simulação da base feita de cantoneiras de aço carbono 1020, e dimensões 3/16" x 1.1/4".

O sistema de fixação do *display* foi projetado no mesmo software, mas foi projetado para ser fabricado em MDF utilizando um Corte à Laser. Isso garante facilidade e rapidez, permitindo maior flexibilidade na fabricação do protótipo.

Com os projetos e as simulações finalizadas e devidamente validadas, é possível seguir com o processo de desenvolvimento de produto e partir para a fabricação de um protótipo funcional. Esse será aplicado e terá seu funcionamento analisado na prática.

## Protótipo funcional

Assim que o protótipo foi elaborado nos softwares de CAD e CAE, atingindo com sucesso as metas que foram desenvolvidas para ele, foi iniciado o desenvolvimento do protótipo funcional.

Para isso, foi adquirida uma balança da marca Filizola, modelo Personal, com capacidade de 180kg, para ser desmontada e ter suas peças utilizadas para a fabricação do protótipo. Foram aproveitadas a célula de carga, o microcontrolador e o *display LCD*. Esses componentes foram todos medidos e levados em consideração na hora de realizar o protótipo em *CAD*, de forma a garantir a compatibilidade entre as peças adquiridas e as peças projetadas.

O processo de fabricação foi iniciado ao desmontar a balança adquirida para medição e análise de seus componentes. As peças não utilizadas foram descartadas, ficando somente com o material necessário. Conforme foi decidido durante a etapa de projeto detalhado, o material utilizado para o protótipo foi aço carbono 1020, tanto para a chapa inferior quanto para a base de cantoneiras. Para o sistema de movimentação do sistema, foram selecionados rodízios comerciais com capacidade de carga individual de 50kg, totalizando 200kg de carga do sistema, e são da marca Colson e modelo 6236.

Na fabricação do protótipo, foram realizados cortes em 45 graus nas cantoneiras para formar a base que a ser encaixada na poltrona já existente. Para isso, foi utilizada uma serra fita ajustada para o corte em ângulo. A seguir, foi realizada a furação da chapa inferior, de modo a fixar os rodízios e a célula de carga. Em seguida, foi realizada a solda das cantoneiras formando a base. Para a solda, foi utilizado o método *TIG* em corrente contínua com polo negativo e fonte de alta frequência para abertura de arco.

O sistema de fixação do *display* de *LCD* foi fabricado nos laboratórios da PUCRS utilizando uma máquina de corte à laser. As peças foram cortadas em 3 partes, de forma que foram montadas com o uso de parafusos para garantir sua união. Os componentes foram instalados no interior do sistema de fixação, e este foi instalado na base do equipamento. Em seguida, foram realizados testes de pesagem para garantir que o sistema estava funcionando como um todo. A Figura 11 mostra o equipamento montado e sendo testado pela primeira vez.

Após a finalização da prototipação, foi realizada mais uma reunião com os *stakeholders* antes da implementação do equipamento para conferência de que este está em conformidade com os requisitos. Durante a reunião, o projeto foi aprovado, e liberada a implementação do protótipo para utilização.



Figura 11: Vista inferior, lateral e frontal do equipamento sendo instalado e testado.

## Análise de funcionamento

Após a liberação dos *stakeholders*, a última etapa do processo de desenvolvimento de projeto foi iniciada, de forma que o protótipo foi implementado na Clínica Nefrocor. Esse teve seu funcionamento analisado e avaliado por todos os *stakeholders* do projeto.

Foi, então, elaborada uma tabela contendo os pontos fortes e pontos fracos do projeto e do protótipo que foram elencados pelos *stakeholders*. Os pontos fracos foram listados de forma descendente em importância, de forma que os itens que devem ser alterados com mais urgência encontram-se no topo da lista.

A Tabela 8 traz as características do protótipo que devem ser mantidas para a fabricação de próximas unidades. Também, foram expostos problemas e características indesejáveis que devem ser revistas para melhorar ainda mais o equipamento. A partir destas informações coletadas, ficou evidente que os resultados obtidos com o protótipo foram satisfatórios para justificar a fabricação de mais unidades para serem implementadas na Clínica.

Pontos Fortes	Pontos Fracos
Fácil de usar	Fonte de alimentação exposta à líquidos
Permite pesagem de pacientes acamados e com baixa mobilidade	Pesado para movimentação entre andares
Fácil de movimentar	Poderia ter integração com computador
Ganho de tempo na pesagem	Rodinhas com freio
Melhora na qualidade de vida dos funcionários e pacientes	

Tabela 8: Tabela de análise de resultados.

## CONCLUSÕES

Ao utilizar o método de desenvolvimento de projetos idealizado por Rozenfeld et al. (2006) o processo de criação e fabricação do equipamento proposto se mostrou bastante objetivo, por se ter uma metodologia completa e abrangente a ser seguida. Isso possibilitou que o protótipo fosse desenvolvido seguindo todos os requisitos de projeto e dentro do prazo estipulado, de forma que seu desenvolvimento teórico foi validado. Sua idealização e desenvolvimento abrangeram os objetivos do projeto: aumentar a facilidade de pesagem dos pacientes e reduzir a incidência de erros de pesagem.

Assim, é possível concluir que o projeto serviu para validar o conceito proposto, de forma que a realização do registro de propriedade intelectual para possibilitar a comercialização de uma versão mais refinada do produto é recomendada, tendo o prazo de um ano a partir do dia 01 de julho de 2022. O protótipo já fabricado seguirá em funcionamento, e mais unidades serão fabricadas para utilização na Clínica Nefrocor.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos aqueles que me apoiaram ao longo de minha jornada acadêmica. Agradeço aos meus pais, Angela Uglione e Carlos Teodósio Da Ros, pela oportunidade e pelo apoio incondicional ao longo do curso, e ao meu irmão Lucas Uglione Da Ros, por todo o apoio e incentivo. Agradeço aos meus chefes, que se tornaram amigos, Luciano de Azevedo Peixoto e Antônio de Azevedo Eick, pelos ensinamentos e pelas oportunidades. Por fim, agradeço aos meus professores, em especial minha orientadora Patrícia Magnago, sem a qual este trabalho não teria sido possível.

## REFERÊNCIAS

AFONSO, J.C. A evolução da balança analítica. **Química Nova** n.27, p6, 2004.

AZEMI, Fatmir; MEHMETI, Xhemajl; MALOKU, Bekim. **The Importance of CAD/CAE systems in development of Product Design and Process of Optimization**. In: **University for Business and Technology International Conference**, 2018.

CUNHA, V. P. (2011). **Análise da gestão de ideias de produtos para apoiar o planejamento da inovação** (Dissertação de mestrado). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

DAUGIRDAS, John T.; BLAKE, Peter G.; ING, Todd S. **Manual de Diálise**. Rio de Janeiro, 2017, Quinta Edição.

DE CAMPOS, C. A. Instituto de Pesos e Medidas do Estado do Paraná. **Classificação de Pesos Padrão**. Paraná, 2013.

JENSEN, M.W et al. **The Examination of Weighing Equipment**. National Bureau of Standards, Handbook 94. Washington, Superintendent of Documents U.S. Government Printing Office 1965.

OLIVEIRA, P. M. et al. Complicações do tratamento hemodialítico em indivíduos com doença renal crônica. **J Bras Nefrol**, Salvador, v. 37, n. 2, Supl. 1, p. 8-50, 2015.

PAHL, G., et al. **Projeto na engenharia: fundamentos do desenvolvimento eficaz de produtos, métodos e aplicações**. São Paulo: Edgar Blücher, 2005.

PIEROBOM, F. M., & ANDRADE, J. J. O. "Application of product development tools in equipment design for a technology-based small business. **Gest. Prod.** v. 27 n. 2 • 2020

ROMÃO JUNIOR, J. E. Doença renal crônica: definição epidemiologia e classificação. **J. Bras. Nefrol**, São Paulo, v. 26, n. 3, supl. 1, p. 1-3, 2004.

ROZENFELD, H., et al. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos**, São Paulo: Editora Saraiva, 2006.

Sancho POS, Tavares RP, Lago CCL. Assistência de enfermagem frente as principais complicações do tratamento hemodialítico em pacientes renais crônicos. **Rev. Enfermagem Contemporânea**, v. 2, n.12013

Veronese, F. V. et al. **Nefrologia na Prática Clínica**. Porto Alegre: Livraria Balieiro, 2019.

# EXERCÍCIOS RESOLVIDOS SOBRE INDUTOR DE CORRENTE ALTERNADA

*Data de submissão: 09/06/2024*

*Data de aceite: 01/07/2024*

### **Filomena Barbosa Rodrigues Mendes**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento Acadêmico de Elétrica  
Pato Branco - Paraná  
<http://lattes.cnpq.br/1945890297316691>

**RESUMO:** Neste capítulo, detalhamos o processo passo a passo para resolver exercícios relacionados a um indutor de corrente alternada. Exploramos as interações entre grandezas eletromagnéticas essenciais, como o fluxo magnético em Weber, a indução magnética em Tesla, o campo magnético em Ampere por metro, a corrente elétrica em Ampere, a densidade superficial de corrente em Ampere por metro quadrado e o potencial vetor magnético em Weber por metro.

**PALAVRAS-CHAVE:** indutor de corrente alternada. Cálculo de campos. Exercícios. Integral de linha. Integral de superfície.

### SOLVED EXERCISES ON ALTERNATING INDUCTOR

**ABSTRACT:** This chapter details the step-by-step process for solving exercises

related to an alternating current inductor. We explore the interactions between essential electromagnetic quantities such as magnetic flux in Weber, magnetic flux density in Tesla, magnetic field strength in Amperes per meter, electric current in Amperes, electric current density in Amperes per square meter, and vector magnetic potential in Weber per meter.

**KEYWORDS:** Alternating current inductor. Field calculation. Exercises. Linear integral. Integral through the surface.

### REVIEW OF INDUCTOR THEORY

The inductor is an electromagnetic device composed of a coil of  $N$  turns of magnet wire, such as copper, wound on a coil form made of insulating material. Inside the coil form, there is a core made up of ferromagnetic laminations isolated from each other. Inductors can be found wound on polar pieces and installed in the slots of electrical machines. In figure 01, it is possible to observe an inductor with an E-I core, with dimensions in millimeters.

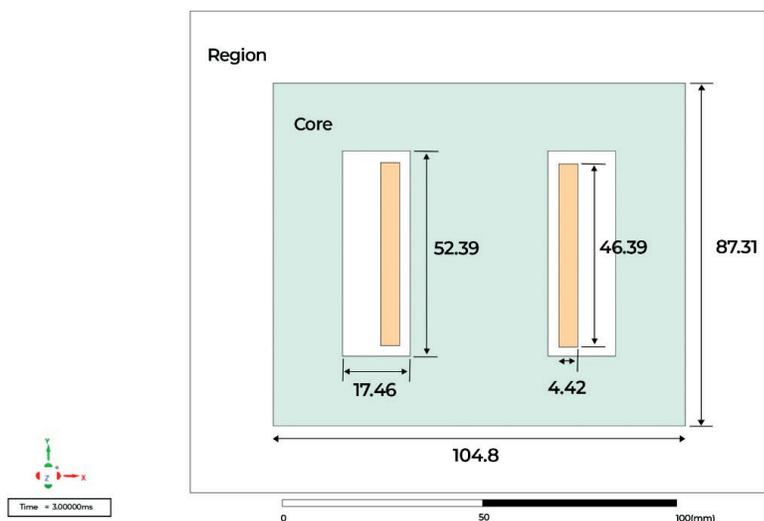


Figure 1 – Two-dimensional drawing of the inductor with E-I core

Source: Own authorship.

When an alternating voltage in volts is applied to an inductor, an alternating current in amperes flows in the coil, generating a magnetic field strength in Amperes per meter. This field is then amplified by the magnetic core, leading to a magnetic flux density in Tesla. The flow of the magnetic flux density vector through the cross-sectional area of the core generates magnetic flux in Webers. The inductor stores energy within its magnetic field strength, making it fundamental for the operation of various devices such as transformers, circuit breakers, contactors, relays, generators, and electric motors.

In the following sections, we will present examples that will help understand the operation of an alternating current inductor, covering the fundamental quantities of electromagnetism and demonstrating the application of linear integral and integral through the surface in electrical engineering. Detailed step-by-step instructions will be provided during the examples. It is recommended that the reader review concepts of electricity, vector calculus, and electromagnetism to follow the sequence. We cite our sources at the end of this work as the main references for a deeper understanding of the subject. Ansys® Electromagnetics Suite, Release 2022 R2, presents a guide with the procedure for simulating problems using the finite element method. In Bastos' work (2019), the concepts of low-frequency electromagnetism are discussed. Krasnov, Kisseliov, and Makarenko (1981) present the fundamentals of vector analysis. Mendes et al. (2019) model the phenomenon of magnetic hysteresis. Bianchi (2005) discusses the concept and application of the finite element method, while Suarez (2007) addresses magnetoelasticity.

## EXAMPLE 1

Consider an inductor formed by 314 turns of magnetic wire. The upper face of the magnetic core, located at  $y = 0.043$  m as shown in figure 02, is subjected to a magnetic flux density given by:

$$\vec{B} = -\left(0.508 + 5.8 \times 10^{-5} \operatorname{sen}\left(-\frac{\pi}{2} + 179.93x\right)\right) \vec{j}$$

Magnetic flux density in T,  $-0.017 \leq x \leq 0.017$  m,  $-0.018 \leq z \leq 0.018$  m and  $t = 3$  ms. Calculate the magnetic flux through the surface.

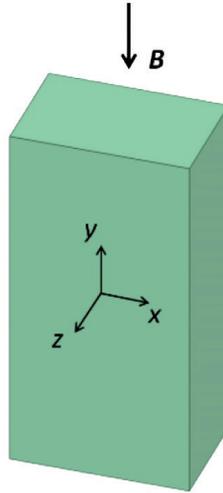


Figure 2 – Magnetic Core.

Source: Own authorship

## Solution

The magnetic flux is given by:

$$\phi = \iint \vec{B} \cdot \vec{dS}$$

$$\phi = \iint \left(0, -0.508 - 5.8 \times 10^{-5} \operatorname{sen}\left(-\frac{\pi}{2} + 179.93x\right), 0\right) \cdot (dydz, dx dz, dx dy)$$

For the upper face located at  $y = 0.043$  m, and therefore  $dy = 0$ , we have:

$$\phi = \iint \left(0, -0.508 - 5.8 \times 10^{-5} \operatorname{sen}\left(-\frac{\pi}{2} + 179.93x\right), 0\right) \cdot (0, dx dz, 0)$$

$$\phi = \iint \left[-0.508 - 5.8 \times 10^{-5} \operatorname{sen}\left(-\frac{\pi}{2} + 179.93x\right)\right] dx dz$$

$$\phi = -0.508 \int_{-0.017}^{0.017} dx \int_{-0.018}^{0.018} dz - 5.8 \times 10^{-5} \int_{-0.017}^{0.017} \text{sen} \left( -\frac{\pi}{2} + 179.93x \right) dx \int_{-0.018}^{0.018} dz$$

$$\phi = -0.508(0.017 + 0.017)(0.018 + 0.018) - 5.8 \times 10^{-5} \int_{-0.017}^{0.017} \text{sen} \left( -\frac{\pi}{2} + 179.93x \right) \frac{179.93}{179.93} dx$$

$$(0.018 + 0.018)$$

$$\phi = -0.00062 + \frac{5.8 \times 10^{-5}}{179.93} \cos \left( -\frac{\pi}{2} + 179.93x \right) \Big|_{-0.017}^{0.017} (0.036)$$

$$\phi = -0.00062 + 1.16 \times 10^{-8} \left[ \cos \left( -\frac{\pi}{2} + 3.0588 \right) - \cos \left( -\frac{\pi}{2} - 3.0588 \right) \right]$$

$$\phi = -0.00062 \text{ Wb}$$

The magnetic flux of 0.00062 Wb in the direction of the negative  $y$ -axis produces a flux linkage, for  $t = 3$  ms, given by:

$$\lambda = N\phi = 314 \times 0.00062$$

$$\lambda = 0.19 \text{ Wb}$$

## EXAMPLE 2

An inductor with a magnetic core was analyzed in the software Ansys® Electromagnetics Suite, Release 2022 R2, and we observed the behavior of the magnetic field strength as shown in figure 03. For this inductor, the magnetic field strength, in A/m, along the right side closed path can be approximated by:

$$\begin{cases} \vec{H} = -\left[ -1.175 \times 10^7 y^4 - 1.147 \times 10^2 y^3 + 3.370 \times 10^3 y^2 - 1.442 \times 10^{-2} y + 20.831 \right] \vec{j} & \text{for } x = 0 \\ \vec{H} = \left[ 2.392 \times 10^5 x^3 - 1.085 \times 10^4 x^2 + 72.141x + 7.444 \right] \vec{i} & \text{for } y = -34.93 \times 10^{-3} \\ \vec{H} = \left[ -1.272 \times 10^7 y^4 + 2.756 \times 10^4 y^3 + 5.377 \times 10^3 y^2 - 7.608y + 20.727 \right] \vec{j} & \text{for } x = 43.66 \times 10^{-3} \\ \vec{H} = -\left[ 3.587 \times 10^3 x^2 - 1.903 \times 10^2 x + 8.866 \right] \vec{i} & \text{for } y = 34.93 \times 10^{-3} \end{cases}$$

Calculate the electrical current that generates this magnetic field strength for  $0 \leq x \leq 0.044$  and  $-0.018 \leq z \leq 0.018$ .

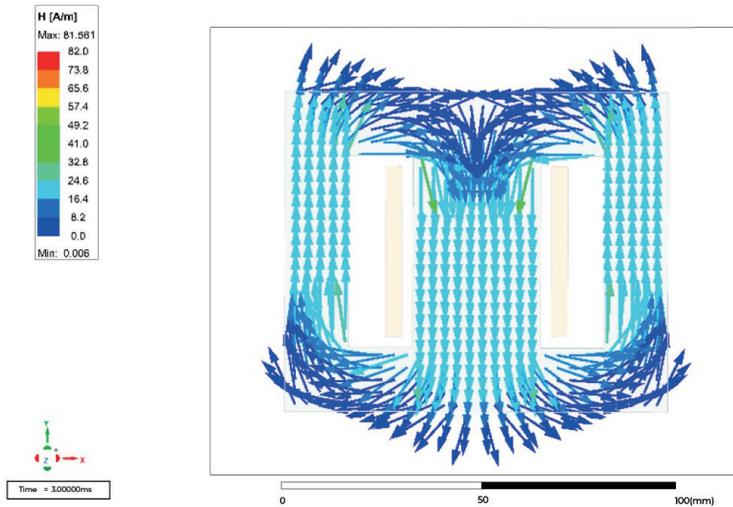


Figure 3 – The magnetic field strength of an E-I core inductor.

Source: Own authorship

## Solution

Electric current is the circulation of the magnetic field strength along a closed loop. Thus,

$$I = \int_{l(s)} \vec{H} \cdot d\vec{l}$$

For the cartesian system, when  $x = 0$ , the change in  $x$  is zero, meaning  $dx = 0$ . Since the magnetic field has components in the  $x$  and  $y$  directions, we are dealing with a two-dimensional (2D) problem, where the change in  $z$ ,  $dz$ , is also zero.

$$I_1 = \int_{l(s)} \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_{l(s)} (0, H_y, 0) \cdot (dx, dy, dz)$$

$$I_1 = \int_{l(s)} (0, 1.175 \times 10^7 y^4 + 1.147 \times 10^2 y^3 - 3.370 \times 10^3 y^2 + 1.442 \times 10^{-2} y - 20.831, 0) \cdot (0, dy, 0)$$

$$I_1 = \int_{0.035}^{-0.035} (1.175 \times 10^7 y^4 + 1.147 \times 10^2 y^3 - 3.370 \times 10^3 y^2 + 1.442 \times 10^{-2} y - 20.831) dy$$

$$I_1 = \left[ 1.175 \times 10^7 \frac{y^5}{5} + 1.147 \times 10^2 \frac{y^4}{4} - 3.370 \times 10^3 \frac{y^3}{3} + 1.442 \times 10^{-2} \frac{y^2}{2} - 20.831 y \right]_{0.035}^{-0.035}$$

$$I_1 = 0.235 \times 10^7 (-0.035 - 0.035)^5 + 0.287 \times 10^2 (-0.035 - 0.035)^4 - 1.123 \times 10^3 (-0.035 - 0.035)^3 + 0.721 \times 10^{-2} (-0.035 - 0.035)^2 - 20.831 (-0.035 - 0.035)$$

$$I_1 = -2.105 \text{ A}$$

For  $y = -0.035$ , the change in  $y$  is zero, meaning  $dy = 0$ , and the change in  $z$  is also zero,  $dz = 0$ .

$$I_2 = \int_{l(s)} \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_{l(s)} (H_x, 0, 0) \cdot (dx, dy, dz)$$

$$I_2 = \int_{l(s)} (2.392 \times 10^5 x^3 - 1.085 \times 10^4 x^2 + 72.141x + 7.444, 0, 0) \cdot (dx, 0, 0)$$

$$I_2 = \int_0^{0.044} (2.392 \times 10^5 x^3 - 1.085 \times 10^4 x^2 + 72.141x + 7.444) dx$$

$$I_2 = \left[ 2.392 \times 10^5 \frac{x^4}{4} - 1.085 \times 10^4 \frac{x^3}{3} + 72.141 \frac{x^2}{2} + 7.444x \right]_0^{0.044}$$

$$I_2 = 0.598 \times 10^5 (0.044 - 0)^4 - 0.362 \times 10^4 (0.044 - 0)^3 + 36,071 (0.044 - 0)^2 + 7.444 (0.044 - 0)$$

$$I_2 = 0.313 \text{ A}$$

For  $x = 0.044$ , the change in  $x$  is zero, meaning  $dx = 0$ , and the change in  $z$  is also zero,  $dz = 0$ .

$$I_3 = \int_{l(s)} \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_{l(s)} (0, H_y, 0) \cdot (dx, dy, dz)$$

$$I_3 = \int_{l(s)} (0, -1.272 \times 10^7 y^4 + 2.756 \times 10^4 y^3 + 5.377 \times 10^3 y^2 - 7.608y + 20.727, 0) \cdot (0, dy, 0)$$

$$I_3 = \int_{-0.035}^{0.035} (-1.272 \times 10^7 y^4 + 2.756 \times 10^4 y^3 + 5.377 \times 10^3 y^2 - 7.608y + 20.727) dy$$

$$I_3 = \left[ -1.272 \times 10^7 \frac{y^5}{5} + 2.756 \times 10^4 \frac{y^4}{4} + 5.377 \times 10^3 \frac{y^3}{3} - 7.608 \frac{y^2}{2} + 20.727y \right]_{-0.035}^{0.035}$$

$$I_3 = -0.254 \times 10^7 (0.035 + 0.035)^5 + 0.690 \times 10^4 (0.035 + 0.035)^4 +$$

$$1.792 \times 10^3 (0.035 + 0.035)^3 - 3.804 (0.035 + 0.035)^2 + 20.727 (0.035 + 0.035)$$

$$I_3 = -2.056 \text{ A}$$

For  $y = 0.035$ , the change in  $y$  is zero, meaning  $dy = 0$ , and the change in  $z$  is also zero,  $dz = 0$ .

$$I_4 = \int_{l(s)} \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_{l(s)} (H_x, 0, 0) \cdot (dx, dy, dz)$$

$$I_4 = \int_{l(s)} (-3.587 \times 10^3 x^2 + 1.903 \times 10^2 x - 8.866, 0, 0) \cdot (dx, 0, 0)$$

$$I_4 = \int_{0.044}^0 (-3.587 \times 10^3 x^2 + 1.903 \times 10^2 x - 8.866) dx$$

$$I_4 = \left[ -3.587 \times 10^3 \frac{x^3}{3} + 1.903 \times 10^2 \frac{x^2}{2} - 8.866x \right]_{0.044}^0$$

$$I_4 = -1.196 \times 10^3 (0 - 0.044)^3 + 0.952 \times 10^2 (0 - 0.044)^2 - 8.866(0 - 0.044)$$

$$I_4 = 0.676 \text{ A}$$

The total electric current along the closed loop is:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$$

$$I = -2.105 + 0.313 - 2.056 + 0.676$$

$$I = -3.172 \text{ A}$$

Therefore, the electric current in the inductor is 3 A, flowing out of the plane.

### EXAMPLE 3

In the right side region of the winding shown in figure 04, the electric current density is given by:

$$\vec{J} = (0, 0, 14230.828) \text{ A/m}^2$$

For  $0.020 \leq x \leq 0.025$  and  $-0.023 \leq y \leq 0.023$  determine the electric current in the winding.

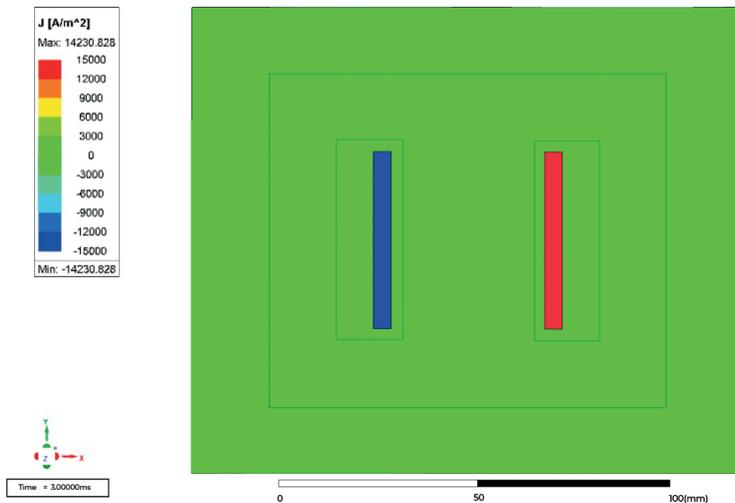


Figure 4 – The electric current density of an E-I core inductor.

Source: Own authorship.

## Solution

$$\begin{aligned}
 I &= \iint \vec{J} \cdot d\vec{S} = \iint (0, 0, 14230.828) \cdot (dydz, dx dz, dx dy) \\
 I &= \iint (0, 0, 14230.828) \cdot (0, 0, dx dy) = \iint 14230.828 dx dy \\
 I &= 14230.828 \int_{0.020}^{0.025} dx \int_{-0.023}^{0.023} dy \\
 I &= 14230.828 \left[ x \right]_{0.020}^{0.025} \left[ y \right]_{-0.023}^{0.023} \\
 I &= 14230.828 \left[ 0.025 - 0.020 \right] \left[ 0.023 + 0.023 \right] \\
 I &= 3.273 \text{ A}
 \end{aligned}$$

The electric current is 3.272 A, flowing out of the plane.

## EXAMPLE 4

On the right-hand side of the winding shown in figure 05, the coil presents an electric current density, in A/m<sup>2</sup>, given by:

$$\begin{aligned}
 \vec{J} &= (0, 0, J_z) \text{ in which} \\
 \begin{cases} J_z = -284620 + 14230828x & \text{for } 0.020 \leq x \leq 0.021 \\ J_z = 14230.828 & \text{for } 0.021 \leq x \leq 0.024 \end{cases}
 \end{aligned}$$

Calculate the current in the coil for  $-0.0232 \leq y \leq 0.0232$  and the divergence of the electric current density.

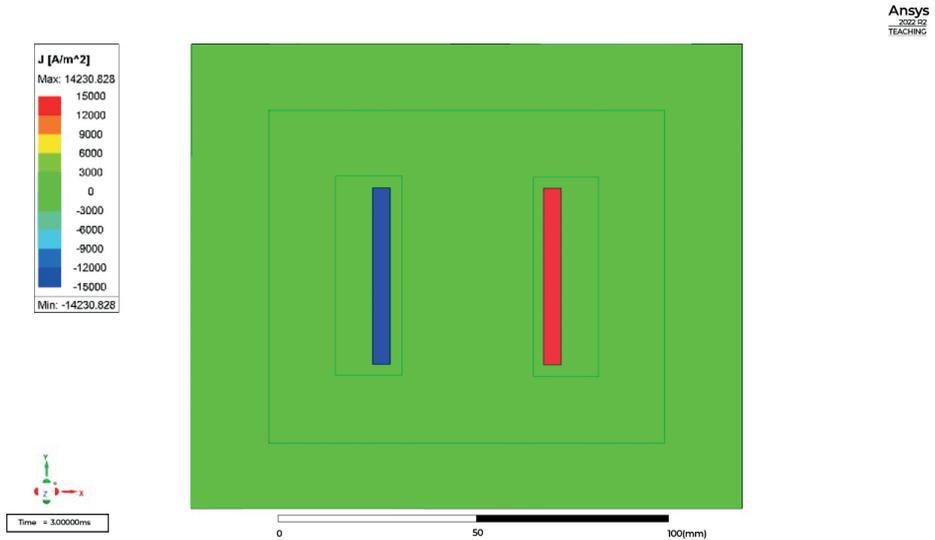


Figure 5 – The electric current density of an E-I core inductor.

Source: Own authorship.

## Solution

For  $0.020 \leq x \leq 0.021$ , we have:

$$I_1 = \iint \vec{J} \cdot d\vec{S} = \iint (0, 0, -284620 + 14230828x) \cdot (dydz, dx dz, dx dy)$$

$$I_1 = \iint (0, 0, -284620 + 14230828x) \cdot (0, 0, dx dy)$$

$$I_1 = \iint (-284620 + 14230828x) dx dy$$

$$I_1 = -\iint 284620 dx dy + \iint 14230828x dx dy$$

$$I_1 = -284620 \int_{0.020}^{0.021} dx \int_{-0.023}^{0.023} dy + 14230828 \int_{0.020}^{0.021} x dx \int_{-0.023}^{0.023} dy$$

$$I_1 = -284620 [x]_{0.020}^{0.021} [y]_{-0.023}^{0.023} + \frac{14230828}{2} [x^2]_{0.020}^{0.021} [y]_{-0.023}^{0.023}$$

$$I_1 = -284620 [0.021 - 0.020] [0.023 + 0.023] + 7115414 [0.021^2 - 0.020^2] [0.023 + 0.023]$$

$$I_1 = 0.327 \text{ A}$$

For  $0.021 \leq x \leq 0.024$ , we have:

$$I_2 = \iint \vec{J} \cdot d\vec{S} = \iint (0, 0, 14230.828) \cdot (dydz, dx dz, dx dy)$$

$$I_2 = \iint (0, 0, 14230.828) \cdot (0, 0, dx dy)$$

$$I_2 = \iint 14230.828 dx dy = 14230.828 \iint dx dy$$

$$I_2 = 14230.828 \int_{0.021}^{0.024} dx \int_{-0.023}^{0.023} dy$$

$$I_2 = 14230.828 [x]_{0.021}^{0.024} [y]_{-0.023}^{0.023}$$

$$I_2 = 14230.828 [0.024 - 0.021] [0.023 + 0.023]$$

$$I_2 = 1.964 \text{ A}$$

The total electric current in the coil is:

$$I = I_1 + I_2 = 0.327 + 1.964 = 2.291 \text{ A}$$

The divergence of the electric current density is given by:

$$\text{div} \vec{J} = \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} + \frac{\partial J_z}{\partial z}$$

For  $0.020 \leq x \leq 0.021$ , we have:

$$\text{div} \vec{J} = \frac{\partial}{\partial x} 0 + \frac{\partial}{\partial y} 0 + \frac{\partial}{\partial z} (-284620 + 14230828x)$$

$$\text{div} \vec{J} = 0$$

For  $0.021 \leq x \leq 0.024$ , we have:

$$\text{div} \vec{J} = \frac{\partial}{\partial x} 0 + \frac{\partial}{\partial y} 0 + \frac{\partial}{\partial z} (14230.828)$$

$$\text{div} \vec{J} = 0$$

This inductor operates on alternating current with a frequency of 60 Hz, considered low frequency then the first Maxwell's equation is expressed as:

$$\text{rot} \vec{H} = \vec{J}$$

Applying the divergence operator, we have:

$$\text{div}(\text{rot} \vec{H}) = \text{div} \vec{J}$$

$$0 = \text{div} \vec{J}$$

## EXAMPLE 5

For the central leg of the inductor shown in figure 06, the vector magnetic potential, in Wb/m, is given by:

$$\vec{A} = (0, 0, A_z) \text{ in which } A_z = 0.009 \times 10^{-3} + 0.508x$$

$$\text{for } -0.017 \leq x \leq 0.017 \text{ and } -0.001 \leq y \leq 0.001$$

The vector magnetic potential presents this behavior near the horizontal line drawn on the central leg shown in figure 06. Determine the magnitude of the magnetic flux density in this range.

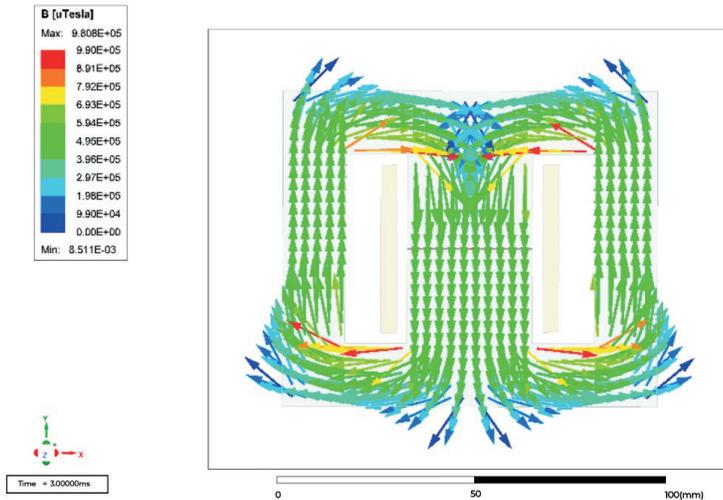


Figure 6 – Vector magnetic flux density of an E-I core inductor.

Source: Own authorship.

## Solution

$$\vec{A} = (0, 0, A_z) = (0, 0, 0.009 \times 10^{-3} + 0.508x)$$

$$\vec{B} = \text{rot}\vec{A} = \left( \frac{\partial A_z}{\partial y}, -\frac{\partial A_z}{\partial x}, 0 \right) = (0, -0.508, 0) \quad |\vec{B}| = B = 0.508 \text{ T}$$

## CONCLUDING REMARKS

In this chapter, we explored the calculation of fields in an inductor with a magnetic E-I core, with 314 turns and a depth of 34.93 mm. We used a two-dimensional model of the inductor in the Ansys® Electromagnetics Suite, Release 2022 R2, choosing the transient magnetic solution with Cartesian geometry. The inductor model was developed considering its different parts: a nonlinear anisotropic core, the copper coils, and the simulation region filled with vacuum. For excitation, we applied a sinusoidal voltage of 127 V at 60 Hz, and for boundary conditions, we established a zero vector magnetic potential at the edges of the simulation region.

The simulation of the inductor in ANSYS Maxwell allowed us to define fields with more realistic behaviors, from which we calculated the magnetic flux, flux linkage, electric current, divergence of the electric current density, and magnetic flux density.

The expressions of the fields used can adequately reproduce the behavior of the inductor, achieving the goals proposed for the study. This work has contributed significantly to a better understanding of the relationships between electromagnetic quantities, such as magnetic flux density, magnetic flux, magnetic field strength, electric current, electric current density, and vector magnetic potential.

## DEDICATION

This work is dedicated to my beloved daughters: Lesly Daiana Barbosa Sobrado and Ketty Keisy Barbosa Sobrado Suarez.

## ACKNOWLEDGMENTS

Thank you, God, for creating the world. I express my heartfelt thanks to the Universidade Tecnológica Federal do Paraná for all the opportunities provided, including IT support, access to Office365, and MATLAB and ANSYS licenses. I am also grateful to my colleagues in the department who have been by my side on this journey.

I am immensely grateful to my late father Jesuíno and my mother Leontina for all the support and care they dedicated to me. My acknowledgment goes to my husband Fredy, who supported and offered wise suggestions during the completion of this work. I also thank Viviane Custódio Correia, whose participation in the inductor prototype calculations, simulations, assembly, and testing was fundamental. My thanks extend to the friends who were part of this journey. Overall, I recognize and appreciate everyone who contributed to the realization of this work.

## REFERENCES

Ansys® Electromagnetics Suite, Release 2022 R2, Help System, **Getting Started with Maxwell: Transient Problem**, Ansys, Inc.

Bastos, João P. A.. **Eletromagnetismo para Engenharia: Estática e Quase Estática**. 4ª edição. Florianópolis: Editora da UFSC, 2019.

Krasnov, M. L.; Kisseliov, A. I.; Makarenko, G. I. **A Análise Vetorial**. Moscou: Editora MIR, 1981.

Mendes, F. B. R.; Leite, J. V.; Batistela, N. J.; Sadowski, N.; Suárez, F. M. S.; Neto, J. P. B. **Comparison and Combination of Techniques for Determining the Parameters of a Magnetic Hysteresis Model**. *Journal of Microwaves, Optoelectronics, and Electromagnetic Applications*, v. 18, p. 408–426, 2019.

Bianchi, Nicola. **Electrical Machine Analysis Using Finite Elements**. CRC Press, 2005.

SUAREZ, Fredy Maglorio Sobrado. **Estabilização Assintótica em Magnetoelasticidade**. 2007. 66f. Tese (Doutorado em Matemática) - Instituto de Matemática, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

# UNMANNED AERIAL VEHICLES BASED 3D CITY MODELING DATA COLLECTION, PROCESSING AND ANALYSIS THE CASE OF YAVUZ SINAN NEIGHBORHOOD

*Data de aceite: 01/07/2024*

**Abdallahman T. Y. Alashi**

Istanbul Technical University  
Faculty of Architecture, Department of  
Urban and Regional Planning

**Özhan Ertekin**

Istanbul Technical University  
Faculty of Architecture, Department of  
Urban and Regional Planning

**ABSTRACT:** In recent decades, Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have shifted from being exclusively used for military purposes to playing a role in civilian applications, with small drones becoming available for purchase in markets. Simultaneously, 3D city models (3DCMs) have taken a significant place in various fields of research, especially after the rise of computer graphics and improved storage abilities. High number of publications and their Compound Annual Growth Rate (CAGR) were observed in both 3DCM and UAV research separately, while limited publications were found when searching for topics involving both 3DCM and UAV. The main motivation behind this research is to integrate UAV technologies into 3D city modeling. Data, including aerial and oblique imagery, were collected in the

Yavuz Sinan neighborhood, located in the historical peninsula of Fatih province in Istanbul. Multiple UAV flights were performed using the DJI Phantom 4 drone and its built-in high-resolution camera, with flight settings based on previous photogrammetry research. The imagery was processed using key-points matching techniques, and the resulting data were integrated into the 3D modeling platform as input. Produced maps were recognized to have higher resolution and accuracy when compared with satellite imagery. The Digital Terrain Model (DTM) was produced from a high-density classified point cloud dataset, with all points classified as vegetation, buildings, or man-made features being removed to create the DTM. The resulting mesh model, relying on both high-resolution aerial and oblique imagery, provides textured building roofs, elevations, as well as vegetation and terrain information. However, the derived buildings' footprints had limitations due to the fact that the buildings are side-attached, leading to the manual editing of polygons to split them into separate buildings of different heights. The generated building masses were represented by least solid polygons, allowing for urban simulation. Finally, in an attempt to examine the analysis ability of

UAV-based 3DCM, a pedestrian wind comfort analysis was performed. The simulation relied on Computational Fluid Dynamics (CFD) for 32 wind directions, with wind data obtained from the nearest weather station. The Lawson wind comfort criterion was used to assess the pedestrian wind comfort at a height of 1.6 meters from the ground. The study concludes with recommendations for maximizing the power of integrating UAVs as data collection tools for 3DCM to overcome data limitations. Lastly, the study provides general guidance for the workflow, highlighting the sections that can benefit future research likely to follow the same approach.

**KEYWORDS:** Unmanned Aerial Vehicles, 3D city models, pedestrian wind comfort analysis, Drone, Yavuz Sinan neighbourhood.

## INTRODUCTION

In the first of October 2019, UAVs' trends according to SCOPUS and Web of Science database were observed throughout different publications in order to examine the importance of UAVs in different fields (Web-1, Web-2). A total number of 56,567 document were found according to SCOPUS academic bibliographic database. On the other hand, a total number of 31,682 document were observed when searching for the same terms in the Web of Science database. Significant rise in the number of publications was observed in the last decade, a number of 114 publications detected in SCOPUS database in 1995, rising to its peak in 2018 with a total of 8711 publications, Figure 1. And a total number of 61 publications according to Web of Science database, reaching its peak at the same year with 5795 publications in 2018. The total number of publications in both SCOPUS and WoS reached 9504 in the last year 2019. The result shows a significant interest and trend for different terms of the UAVs as observed from both academic databases.

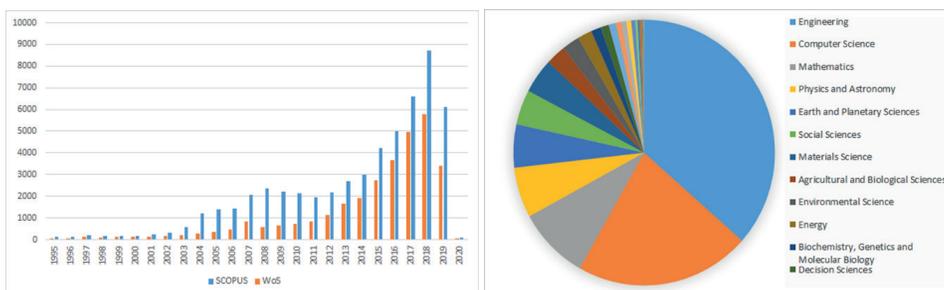


Figure 1. UAV Publications by year according to SCOPUS and WoS Databases (Web-1, Web-2) (Date: October 2019) (left), UAV Publications by subject area according to SCOPUS Databases (Web-2) (Date: October 2019) (right).

When viewing the records according to different subject area, a total of 37834 publications were published in engineering subject area according to SCOPUS, which resembles 67% of the total number of publications, 22425 publications were under the computer science subject area, Figure 1. For both social and environmental sciences, 4407 and 2255 publications were observed respectively, whereas there is a need to be awareness with the power of UAVs, which can be used widely in the academic social and environmental research studies.

It is worth mentioning that United States and China are the leading countries for the UAVs publications in both SCOPUS and WoS database, with a total number of 24372 and 16521 respectively in both databases. Followed by German, England and South Korea, Italy which are competing in the third forth, and fifth sixth places. Turkey lies in the seventeenth and fifteenth rank according to number of publications in SCOPUS and WoS respectively, with a total number of 1140 publications in both databases, representing about 1.3% of total publications.

In Turkey, analysis was done according to SCOPUS database for a total of 653 publications and 5551 citations when searching for the same term, the highest affiliation observed was 91 documents for Istanbul Technical University (ITU), followed by Middle East Technical University (METU) and Turkish Air Force academy with 79 and 59 publications respectively. Both number of publications and citation reached its peak in year 2018, with 100 documents published and 1177 citation. According to WoS for total of 487 documents and 3779 citations, again Istanbul Technical University (ITU) leads the rank with 73 documents, followed by Turkish Air Force and Turkish Air Force academy with same number of 62 publications. The peak for both publications and citation go back to 2018 again, with 75 document and 840 citation, Figure 2.

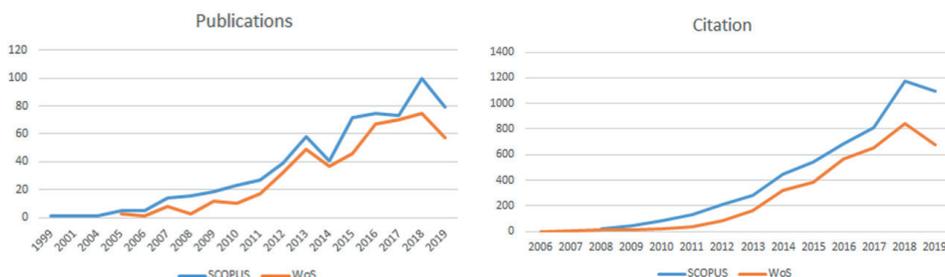


Figure 2. UAV Publications in Turkey by year (Right), UAV citations for Turkish publications by year (Left) (Web-1, Web-2) (Date: October 2019).

In the second half of November 2019, 3D virtual city trends according to SCOPUS (Web-2) and Web of Science (Web-1) database were observed throughout different publications in order to examine the trend of 3D virtual cities' various terms with regard to different subject areas. A total number of 13,634 document were found according to SCOPUS academic bibliographic database. On the other hand, a total number of 35,894 document were observed when searching for the same terms in the Web of Science database. Significant rise in the number of publications was observed since 1995, a number of 31 publications detected in SCOPUS database in 1995, rising to its peak in 2018 with a total of 1470 publications (Figure 3). And a total number of 165 publications according to Web of Science database in 1995, reaching its peak at the same year with 3874 publications in 2018. The total number of publications in both SCOPUS and WoS reached 4062 in the last year 2019. The result shows a significant interest and trend for different terms regarding 3D virtual cities from both academic databases.

When viewing the records according to different subject area, a total of 5497 publications were published in computer science subject area according to SCOPUS, which resembles 22% of the total number of publications, 4023 publications were under the engineering subject area (Figure 3). For both social and environmental sciences, 3778 and 1762 publications were observed respectively, resembling 22% of the total publication regarding the academic social and environmental research studies.

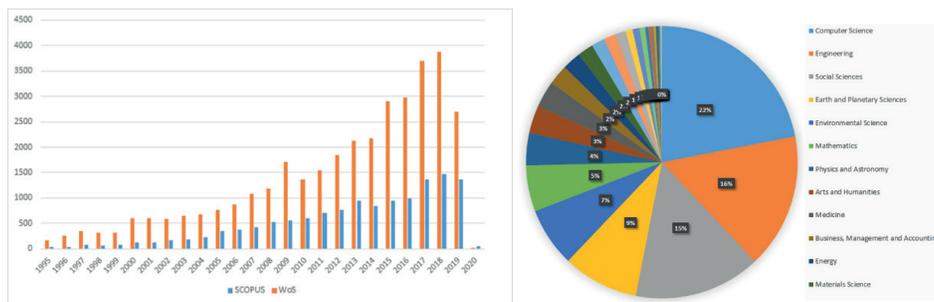


Figure 3. 3D Virtual City Global Publications by Year according to SCOPUS and WoS Database (Web-1, Web-2) (Date: November 2019) (left). 3D Virtual City Publications by subject area according to SCOPUS Database (Web-2) (Date: November 2019) (right).

Worth mentioning that United States and China are the leading countries for the 3D virtual city publications in both SCOPUS and WoS database, with a total number of 12,705 and 9,993 respectively in both databases. Followed by German, England and Italy in SCOPUS, and Mexico, Japan, and Canada in WoS database. Turkey lies in the sixteenth and twenty seventh rank according to number of publications in SCOPUS and WoS respectively, with a total number of 547 publications in both databases, representing about 0.11% of total publications.

In Turkey, analysis was done according to SCOPUS database for a total of 227 publications and 1452 citation when searching for the same term, the highest affiliation observed was 27 documents for Istanbul Technical University (ITU), followed by Ankara University and Middle East Technical University (METU) with 17 and 17 publications respectively. Comparatively, according to WoS for total of 320 documents and 6,003 citation, Middle East Technical University (METU) leads the rank with 38 documents, followed by Istanbul Technical University (ITU) with a total number of 32 publications. Number of publications for both databases reached its peak in year 2017, with total of 70 document published, whereas citation reached its peak in 2019 according to SCOPUS with 323 citations, and in 2018 according to WoS with 1390 citation (Figure 4).

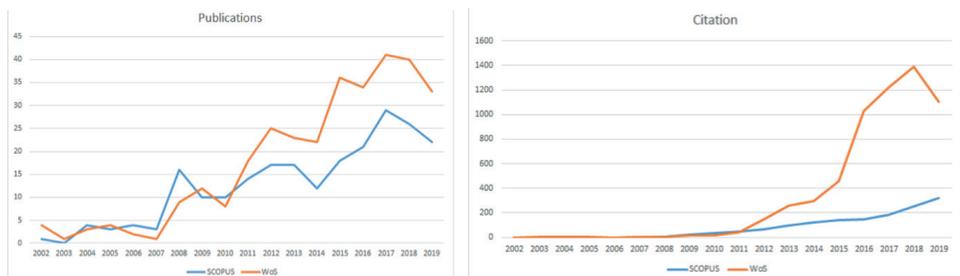


Figure 4. 3D Virtual City Publications in Turkey by year according to SCOPUS and WoS Database (Web-1, Web-2) (Date: November 2019).

Similarly, by examining the trend of both 3D virtual city and UAV together, a total number of 182 publications were found when examining SCOPUS database (Web-2). For 182 publications found, a total of 903 citation were detected, highest publication number goes back to 2017, while highest citation detected was in 2019 (Figure 5). Publications covered various subject areas, 30% of publications were found under computer science, followed by engineering and social sciences with 17% and 13% respectively. Both social science and environmental science subjects involved 18% of the total publications (Figure 5). Again, China and USA were the leading countries of the publications, with 27 and 25 publications respectively, followed by Italy, German and France. Turkey took the seventh rank with seven publications, representing 3.8% of the total publications. In Turkey, the seven publications detected were cited 174 times, the highest citation with 133 cite were for Pehlivanoglu (2012). Highest affiliation were Istanbul Technical University (ITU) and Hacettepe University with two publications each. WoS were not included in the integration due to imprecision of the data results when searching for the same terms.

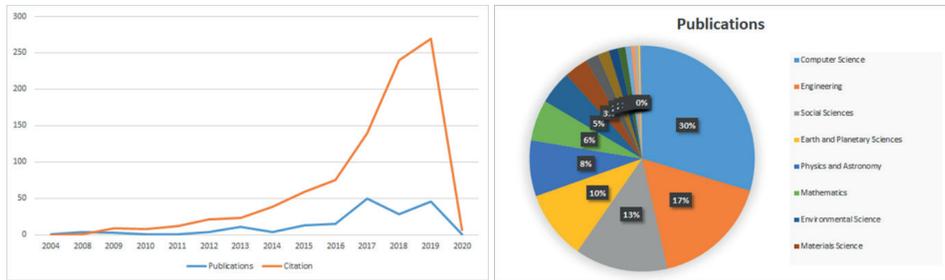


Figure 5. 3D Virtual City and UAV Publications and Citations by year (Web-2) (Date: November 2019). 3D Virtual City and UAV Publications by Subject Area (Web-2) (Date: October 2019).

Table 1 below concludes SCOPUS and WoS database results with regard to 3D virtual city, UAV, and the combination of both terms. Cumulative annual growth rate (CAGR) between 2008 and 2018 were calculated (Eq. 1) to show the high trend of both terms, while the shortage of publications with regard to their integration. Although the CAGR in the global publications regarding the integration of 3D virtual city and UAV is increasing, but it is not the case in Turkey, which covers almost 19.2% of the global citation.

$$CAGR = (SP/PP)^{1/(n-1)} - 1 \quad (1)$$

Comparison Point		3D Virtual City		UAV		3D City and UAV	
		Global	Turkey	Global	Turkey	Global	Turkey
Total Publications	SCOPUS	13,634	227	56,567	653	182	7
	WoS	35,894	320	31,682	487	NA	NA
CAGR 2008-2018	SCOPUS	12%	6%	16%	56%	<b>24%</b>	<b>0%</b>
	WoS	14%	18%	29%	64%	NA	NA
Total Citation	SCOPUS	NA	1,452	NA	5,551	<b>903</b>	<b>174</b>
	WoS	NA	6,003	NA	3,779	NA	NA

Table 1. SCOPUS and WoS database results: 3D virtual city, UAV, and the combination of both terms, CAGR.

In Turkey, seven studies were detected in Turkey with both UAV and 3D virtual city key words included. The highest citation was for Pehlivanoglu (2012) followed by Koyuncu and Inalhan (2008), both articles focus on the flight path planning algorithms. Uysal et al. (2013) used photographs generated from UAV with attached Canon camera to it as a reference for a manually modeled a historical mosque, which can be used for cultural heritage documentations. Anbarođlu (2017) examined the potentials of using UAV for logistic and cargo delivery purposes in urban environment. Yałçin et al. (2017) used UAV to scan Istanbul Technical University campus, generating 3D point cloud dataset, which by segmentation algorithms can be used to generate 3D model robustly, to perform urban solar

analysis map. Yürür et al. (2017) proposed an approach of 3D geological site reconstruction using UAV based high resolution imageries, the study aims at transferring these maps for the future generations as a documentation for their geological heritage. Erenoglu et al. (2017) compared UAV surveying abilities with the traditional terrestrial surveying methods, high accuracy results of UAV based model was detected, with -0.0055 meters average error, which shows the high accuracy and reliability of the generated outputs from UAV survey.

## STUDY AREA

Istanbul is the most popular city in Turkey, it is considered to be Turkey's touristic, cultural and historical capital. Istanbul is located in north east of turkey (Figure 6). It connects the Asian and European sides of the country through three bridges, the city is popular with the major urban waterway known as golden horn, which separates the historical and the modern part of the city. Fatih district is the capital district hosting provincial authorities' buildings, the district is surrounded by the golden horn from a side, the Marmara Sea, and the old city walls, which is known as the historical peninsula of Fatih (Figure 6). Fatih district contains a total number of 57 neighbourhood, including Yavuz Sinan neighbourhood, the case study of the thesis.

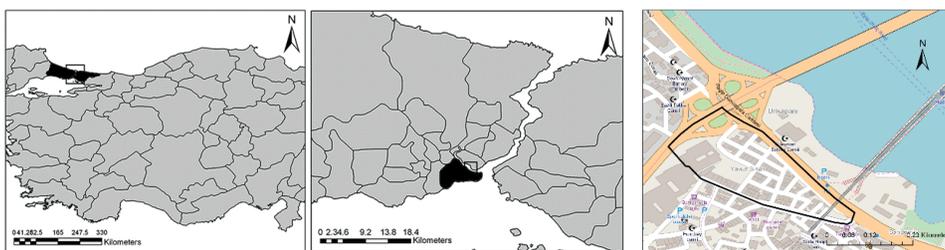


Figure 6. Location of Istanbul in Turkey's Map (Left), Location of Fatih District in Istanbul's Map (Middle), Yavuz Sinan Neighbourhood Map (Right).

Yavuz Sinan neighbourhood is located in the historical peninsula side of the golden horn, between two bridges that connect the historical peninsula with the other side of the golden horn, the first bridge for both vehicles and pedestrians is Ataturk bridge, and the second bridge for metro and pedestrians is golden horn (Halic) bridge (Figure 6). Yavuz Sinan neighbourhood has an area of 0.051 square kilometre, with a total of 252 population, the maximum building heights of the neighbourhood is about 15 m. the neighbourhood includes 1 commercial building, 3 mosques, residential houses with commercial shops or restaurants in ground floor, and hotels. For the data collection, multiple drone flights were done to capture all the buildings from top and sides, in two separate days, flights were performed, the following section briefly discuss the UAV regulations in Istanbul, Turkey. Then procedures of data collection will be clarified.

## Istanbul UAV Regulations - Directorate General of Civil Aviation (IHA)

Before going through the data collection section, it is important to highlight Istanbul's regulation with regard to UAV, Directorate General of Civil Aviation (Web-3) is the responsible institution for civil UAV registration, air traffic service, and flight operations. Terms used in UAV regulation section will be discussed with accordance to Istanbul case depending on the regulations provided by the institution (Web-4). (A) Applicability: Weight classification in Turkey are four classes (Table 2). IHA-0 and IHA-1 vehicles must be registered to the DGCA internet-based registration system before performing any flights. DGCA should be informed before performing trial flights with the scope of research and development of UAVs (Web-4).

Personal License	Weight
IHA-0	Less than 500 gr
IHA-1	500 gr to less than 25 kg
IHA-2	25 kg to less than 150 kg
IHA-3	150 kg and more

Table 2. IHA license Classes by weight (Web-4)

(B) Technical requirement: Regarding the technical requirements, regulations provided by the Directorate General of Civil Aviation institution (Web-3) in both categories of IHA-0 and IHA-1 regulates the presence of product catalogue, production year, manufacturer country, criminal record for the owner, conformity of standards provided by the manufacturer, and invoice with GTIP code. These procedures ensure the technical safety of the UAV, so as to be applicable for flights in Turkey. Technical specifications provided in Turkey's civil aviation law (Web-4) includes emergency landing option, battery monitor, etc. specifications are assigned to various UAV categories specified in the table 3.1. It is highly recommended in the pre-flight process to carefully follow the instructions (Web-4) provided by the government for the public and self-safety, hiring a professional UAV pilot is recommended in the first flight.(C) Operation Limitations: Turkish authority defined sensitive and secured zones where UAV are either not allowed, or allowed with certain restrictions (like altitude), these restrictions and zones are then assigned to the manufacturer company's flight planning smart device applications. The Geo zone map (no-fly zone) (Web-5, Web-6) of Istanbul (Figure 7) shows zones assigned to airports, prisons, and local administrative areas. Highly detailed maps can include densely populated areas, whereas different types of restriction zones can be assigned. Fly Safe Geo Zone Map (Figure 7) provides also different restriction maps for various UAV products of DJI company. It is usually highly recommended to check the map before the choice of the case area in the pre-flight process. (D) Administrative Procedures: Following the instructions and achieving the requirements of UAV in some countries are not enough, administrative permissions are also required in case

of Turkey. Several permissions including safety declarations and usage permission from the Information Technologies and Communication Authority should also be included, informing the authority by the date, number and frequencies of the flights (for civil traffic control purposes). The administrative procedures and permissions in most cases are considered as an obstruction to the usage of UAV, as it hardly can be obtained. (E) Human Resource Requirements: Qualification of the operator mainly dependable on the category of the UAV in table 2. It is illegal to perform any flight unless the operator had training and knowledge, operator with no UAV license convenient to the weight category may expose the operator to legal liability. To overcome such issue, a professional licensed operator was hired to perform this study's surveying flights. The operator in our case didn't have a pre-knowledge with the mapping applications and processes, but was aware of the emergency landings, battery endurance, and most importantly, the regulations assigned by the local government, which affected even the case study choice.

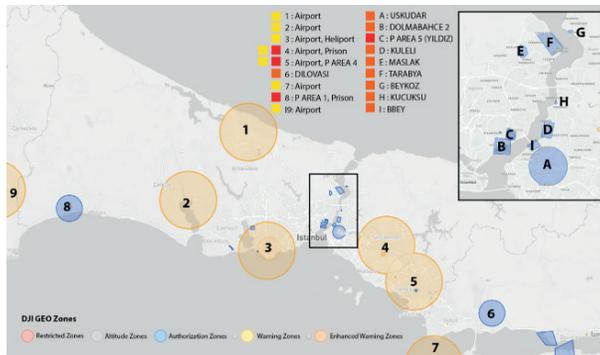


Figure 7. GEO Zone Map Istanbul (Web-5, Web-6).

## DATA COLLECTION

In order to cover the whole area of the neighbourhood and its surrounding, multiple flights designed using PIX4D mobile application, including both aerial and oblique photos, the drone used in the imagery process was DJI Phantom 4. The choice of the drone depended on several aspects, firstly is its ability to capture high resolution 4k images, the images' size produced by the drone is 4000\*3000 pixels, with 72 dpi resolution, all photos produced has geo-referencing according to the built-in GPS, with latitude, longitude and altitude measurements, the camera has gimbal that stabilize the image for less blurriness during the drone's motion and has the ability to capture different camera angle (oblique, aerial). Secondly, the DJI platform is compatible with different data processing tools like PIX4D mapper, Reality Capture, and Drone Deploy, along with its compatibility with the flight planning tools of the same platforms. Thirdly, the weight of the DJI Phantom 4 is 1380 grams, making the pilot license falls in the least license category according to the Turkish

Civil Aviation Law (Web-3). Lastly, the battery of the drone lasts for about 20 minutes, including the take-off and landing, giving about 15 minutes single flight maximum duration. As for mentioning, the used drone in this thesis was rented with daily fees including license holder operator, the fees are included in the cost section bellow.

As mentioned, several flights were performed in a duration of two days. Details of these flights are as following, (1) Flight Day One: Dates 4th of October 2019, the images were taken between 2:53 pm and 3:44 pm, the total number of the images taken were 137 images, the basepoint of the operator was on the golden horn walkway, two aerial flight and two grid oblique flights (Figure 8). In the aerial flight, drone altitude was set to be 80 meter above ground, camera angle set to be 90 degree (perpendicular to ground), front and side overlap of 70%, grid were aligned with the street pattern in the first flight (about 4 min duration), and perpendicular to it in the second flight (about 5 min duration), 42 image were captured in both directions. In the oblique flights, double grid mission was performed, drone altitude was set to be 80 meters, camera angle was set to be 60 degrees not looking at grid centre (camera face along the grid lines), with front and side overlap of 60%, with a total duration of about 12 min, 96 images were captured.

Images captured in this day were considered to be a trial, to examine the and better understand the whole process, images were processed in multiple programs, the general observations were that numerous buildings' elevations were not captured, due to the narrow street grid of the neighbourhood, the orhtomosaic map produced was of 19352 pixels width and 12398 pixels height and 96 dpi resolution. the first processing time in PIX4D desktop took about 4 hours, in PIX4D and Drone Deploy platforms, just took the images uploading time, the resulted mesh had some distortions in the buildings' elevations. As mentioned, the problem was that number of buildings' elevations were not captured due to the narrow street grid, this resulted in the second flight day.

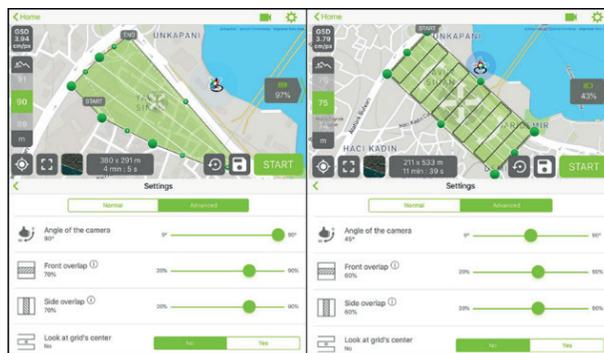


Figure 8. Flight 1 plan and settings (Pix4D App), Aerial flight (left), oblique flight (right).

(2) Flight Day Two: Dates 15th of October 2019, the images were taken between 2:41 pm and 4:31 pm, the total number of images taken were 807 images, since there isn't distortion in the orthomosaic map, only oblique photos were taken, whereas all georeferenced images can be combined in the processing, the basepoint of the operator was on building roof top terrace (Figure 9), enabling the operator to trace the drone and perform wider radius away from the controller. A total number of five oblique flights were performed, drone altitude was set to be 55 meters, in order to capture all buildings' elevations, front and side overlaps were increased to be 90% and 70% respectively, the camera angle was set to be 60 degrees not looking at grid centre (camera face along the grid lines).



Figure 9. Flight 2 plan and settings (Pix4D App), oblique flights (left), Circular path flight (upper right), oblique flight settings (lower right).

By increasing the front overlap, the drone captured more photos along its motion, lowering its speed when compared to previous flights, and by increasing the side overlap, the drone had to travel longer distance to cover the given mission area. By the first day mission's settings, we could cover the whole area by one flight, but by applying the second day mission's setting, there was a need to split the scanning into three overlapping sections. Double grid mission was performed in each section with the given mission settings applied, each planned to be about 12-minute duration and grids were aligned with street's pattern. Followed by two circular missions to capture the external building's walls which appeared to be distorted in the previous mesh model, angle between images were set to be 5 degrees in the first flight, and 10 degrees in the second, depending on the available drone battery. The resulting georeferenced images were added to the aerial images produced previously, creating a dataset of 944 georeferenced aerial and oblique images that were used in the processing.

Other datasets used in the generation of the 3D neighbourhood model were the neighbourhood base map, the file format used is DXF file, where the buildings' footprint was filtered, georeferenced, flattened, and put on top of orthomosaic map to examine its

compatibility. Streets' data base used in the production of the three-dimensional model is produced from OpenStreetMap data base (Web-7), buildings of open street map data base were not used to conduct the 3d due to its incompatibility with the orthomosaic map.

DJI Phantom 4 was used as mentioned in data collection section, the controller was connected to a smart device having the mission planning application and connected to the internet. For the processing and 3d model implementation, portable gaming computer device aside to different cloud platforms that uses workstations to process data, the used device is Lenovo Ideapad Y700, with the following specifications: CPU: 2.6GHz Intel Core i7-6700HQ (quad-core, 6MB cache, up to 3.5GHz with Turbo Boost), Graphics: Nvidia GeForce GTX 960M (4GB DDR5 VRAM), Intel HD Graphics 530, RAM: 16GB DDR4 2133MHz and Storage: 128 GB SSD, 1TB HDD (5,400 RPM).

The software used in the study are divided into 4 categories, data collection software and applications, data processing software and platforms, 3D model implementation software, and presentation software, see Figure 10.

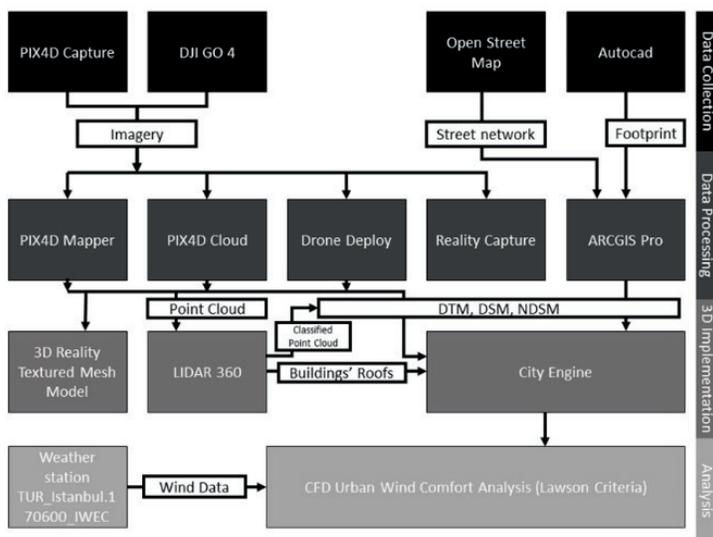


Figure 10. Work Flow according to Software Used.

#### Data collection software and applications

- PIX4D Capture: Mission planning and control application used to capture drone imagery with precise overlap, the application is totally free and can be used through smart devices
- DJI GO4: application designed by the manufacturer of the DJI Phantom 4, and it is used to track the drone while being on mission, it views live streaming of the drone camera, providing details about the altitude and precise location on map.

- AutoCAD 2020: 2D data provided were modified, flattened, and filtered. In order to be used as building footprints.
- Open Street Map: the open-source platform was used to provide the model with city model elements like streets, buildings footprints were incompatible with the real situation thus were ignored.
- ARCGIS Pro: the software provides different file formats, allowed the overlapping of the DWG buildings footprints and the orthomosaic map, beside the geo-referencing of the DWG file on the map.
- 3.3.2 Data processing software and platforms
- PIX4D Mapper: photogrammetry software used for imagery allocation and the production of point cloud data, used for generation of multiple datasets used in the study beside the data quality report
- PIX4D Pro Cloud: images were uploaded to the cloud to control the precision of the data produced by the software.
- Drone Deploy Dashboard: images were uploaded to the dashboard, to be processed, and to provide variable datasets used for the study.
- 3D Survey: software used for the classification of the point cloud data set for buildings' roofs, to be used as building heights reference in the 3d model generation.
- ARCGIS Pro: software used to transfer the DWG footprints to polygons, as to be used in the model generation. Different geo-referenced datasets were viewed to control their accuracy.

### 3D Model Implementation software

- City Engine: different 2D datasets and 3D maps used in the study were integrated to create the final 3D model of the neighbourhood.
- CityGRID: software used in the model texturing according to the aerial and oblique image dataset.

### Presentation Software

- Adobe Photoshop CC 2019: imagery and maps refining and editing software.
- ARCGIS Pro: Software used for the presentation of maps included in the study, providing scale bar, map legend, and north arrow.
- Reality Capture: drone produced imagery were reprocessed, and point cloud data were produced, the software doesn't provide data export unless having a paid license, thus was just used for point cloud presentation.
- Cesium Ion: platform used for the final product visualization.

## Cost Overview

The reliability of UAV as a surveying depends on the precision of the data and the cost effectiveness of such surveying tool, so it is crucial to highlight and discuss various processes performed in this study. The table below clarify the processes regarding this study giving the cost of each step in the processes. Since costs are time and location dependable, it is important to consider both the date and the case study (including the total area covered) before proceeding into this section. All prices given in table 3.2 are in US dollars. Steps applied in this study, additions and alternatives are provided reviewing a full cost review for both research and commercial purposes.

Worth mentioning, free versions of commercial applications and software and dashboards in most cases doesn't provide a full availability of processing; whereas limited editions are provided as a trial version. The study relied mainly on the open-source software, but difficulties with regard to the open-source application setup (as in case of CGAL) and processing (as in case of Open-FOAM analysis and photogrammetry software) were detected. The open-source software in many cases were found not user friendly, depending on script language and coding pre-knowledge. Unlike commercial software open-source software lacks video and document tutorials. As mentioned with regard to data collection, hiring a professional licensed operator with daily rent was found more cost effective than purchasing the UAV, battery, smart device, and licensing expenses, which can be less effective in case of commercial dependent surveying.

Process	Step	Product	Cost	Alternatives	Cost	
Data Collection	Surveying	DJI Phantom 4 Pro	2,900	DJI Phantom 4 Pro Daily Renting with Licensed Operator	Around 185	
		DJI Phantom 4 Pro 2 Batteries	450			
		Smart Device	300			
		License	See ()			
		Drone Deploy	0			
Data Processing	GCP	3D GPS	133	University Laboratory	0	
	Personal Computer	Lenovo	1000	University Laboratory	0	
	2D Software	AutoCAD	500	Student Version	0	
	Spatial data processing	ARCGIS	800	University Laboratory	0	
	Photogrammetry processing	Pix4D	520 per month	Limited free trial	0	
		Drone Deploy	399 per month	Free Trial 1 month	0	
	Point Cloud Processing	LIDAR 360	0	CGAL Classifier	0	
	Building Footprint Generation	ARCGIS	800	University Laboratory	0	
	Mesh Generation	MeshLab	0			
	Mesh Processing	Blender	0			
	3D Implementation	3D City Modeling	CityEngine		Free Trial 1 month	0
		Data Driven Method	CGAL	0	Building Reconstruction	NA
	Analysis	Pedestrian Comfort Analysis	Simulation Hub	500 monthly	Free Trial for 1 Analysis	0
CFD Analysis		Open-Foam	0			
Presentation	Image Editing – Maps Presentations	Adobe Photoshop	239	University Laboratory	0	

Table 3. Cost Overview.

## DATA PROCESSING

In this section, data quality will be reviewed according to the software reports, then various processing for various produced 2D and 3D data will be explained and clarified, as to be an input for the 3DCM.

## Data Quality Report

Observations found from the first flight data quality report for the neighbourhood and its surrounding (0.212 km<sup>2</sup> according to the report), total processing time was 19m:41 s, median of 37493 key points per image were detected, 126 out of 137 images calibrated (91%). Generated points' density was 8,291,377 points, with an average density of 59.75 per cubic meter, Figure 11 shows the reported data results. As mentioned, the generated mesh and point cloud data were lacking parts of building details, due to the street width and the low front overlap in the flight settings, also distortion can be observed in the generated 3D mesh model. The orthomosaic map was satisfying but the DSM generated had the same distortion problem as the mesh model, see Figure 12, as the DSM depends on the point cloud data. It was concluded that the oblique flight settings need modifications, in order to capture all buildings' elevations, for more precise DSM and 3d mesh model.

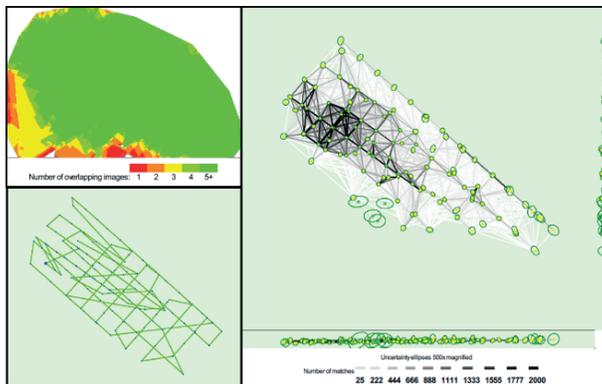


Figure 11. Data Quality Report for flight 1, images overlap map (upper left), initial images' position (lower left), links between matches (right).



Figure 12. Buildings' distortion in the mesh of flight 1 (up), DSM distortion for flight 1 (down).

Accordingly, by increasing the front overlap of the flight settings (as mentioned in flight day two in the data collection section), the area covered was 0.257 km<sup>2</sup>, representing the neighbourhood and its surrounding, total processing time was 02 h:27 m:16 s, median of 35909 key points per image were detected, 921 out of 944 images calibrated (97%). Generated points' density was 29,588,885 points, with an average density of 89.19 per meter, Figure 13 shows the reported data results. The resulted data were satisfying with regards to both 2D and 3D datasets created, thus can be used after several processing as an input for 3DCM generation and implementation, the following section shows a separate explanation and clarification of these various datasets. Figure 14 shows the resulted mesh of processing the second flight data.

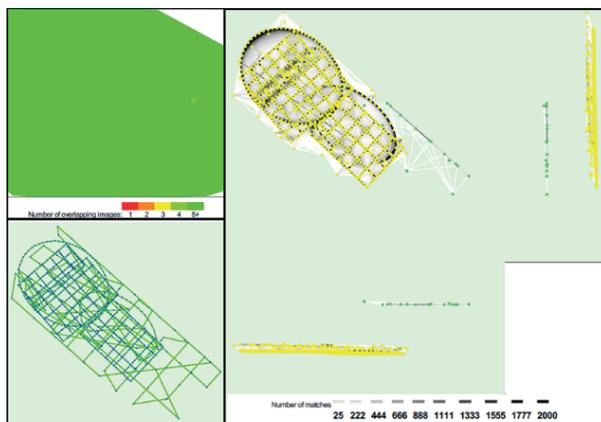


Figure 13. Data Quality Report for flight 2, images overlap map (upper left), initial images' position (lower left), links between matches (right).

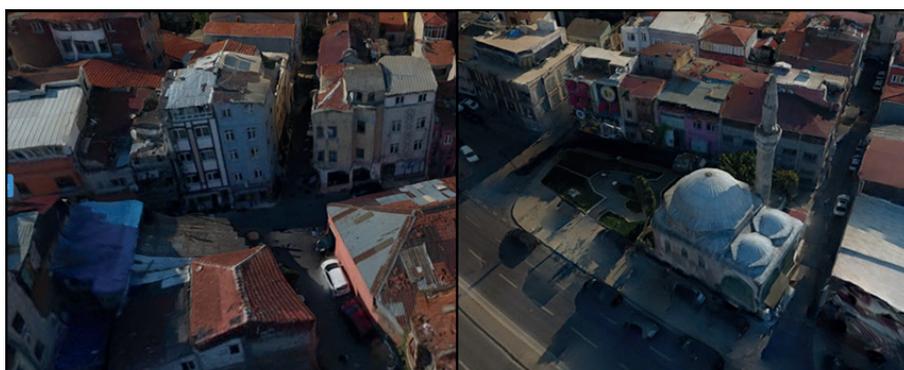


Figure 14. Buildings' mesh of flight 2

## Orthomosaic map

The raster map produced through merging geo-located aerial imagery produced by the UAV for the study area was observed to be 33041\*25255 pixels width and height respectively, 96 dpi resolution vertically and horizontally, RGB photometric interpretation, 625 MB size, and 35 mm focal length, see Figure 15. The output map is a Geotiff (.tif) format, real world scaled, whereas measurements can be performed. The map resolution is +/-3 cm, which is more precise and clear scanning when compared to satellite maps of +/-30 cm resolution. Such high-resolution maps can easily be used in digitalizing different city objects with higher accuracy, or even tracking and monitoring developments through multiple flights (Gevaert et al, 2016). The difference in resolution between the produced orthomosaic map and Esri ArcMap (Web-8) satellite base map can obviously be observed in Figure 16; buildings' footprint for example can barely be manually produced or checked through the satellite imagery of ArcMap.



Figure 15. Ortho-mosaic Map.

Although the produced orthomosaic map show high detailing of buildings, streets, vegetation, and roofs, with real world 1:1.166 scale, high shadows can be significantly observed in the map. The scanning time accordingly is a crucial factor to be considered during the flight planning, whereas the optimum time for UAV scanning is between 11:00 am and 02:00 pm, where the sun is almost perpendicular on the surface, for less sun shadow effect. Worth mentioning, the data captured of such resolution may fall under the data protection UAV regulation mentioned in the UAV Regulations and Public Acceptance section above, whereas it may include personal or private data (Fotouhi et al, 2019), thus data must be wisely stored, processes, or transferred.



Figure 16. Ortho-mosaic Map (Left) and Satellite imagery (Right).

## Point cloud Dataset

Point cloud data is the major deriver of all the upcoming data, including DSM, DTM, and 3D mesh model. Point cloud database contains huge number of three-dimensional coordinated points, these points are the produced data of 3D scanners or imaging, which are used to represent points on the surface of scanned objects (Chua et al, 2017). The Las file produced is of 733MB size, containing 29,588,885 points, 89.19 mean density per meter, with about 70 meters z range, containing RGB value for each point. Unlike the point cloud datasets derived from satellite imagery or aerial photos, the highest point densities can be seen on the buildings' facades, due to the high matching points of oblique imagery that captured the sides of buildings, see point cloud density map. The created point cloud is generated through matching key points of aerial and oblique imagery captured by UAV, whereas the geo-referenced imagery matchings of object surfaces are processed via Drone Deploy software of different perspective imagery, section of the created point cloud can be seen in Figure 17.



Figure 17. Point Cloud Sections.

## Point Cloud Classification

The production of various datasets from point cloud data are depending mainly on the classifications of the points into different categories, including ground points, buildings, building roofs, high vegetation, low vegetation, and others (cars, lamp post, etc.). Ground points were automatically detected using classification tool of ArcMap software, which helped in the generation of the DTM. Point cloud sections seen in Figure 17 helped in the recognition of various city elements for the classification process, which depended mainly on training sessions and machine learning classification technique. Both LIDAR 360 and CGAL classifier software are open source that provide point cloud data classification via training session, where section of the dataset is chosen to be classified manually, then machine learning technique takes the manually classified section as a reference for classifying the whole datasets, see Figure 18.

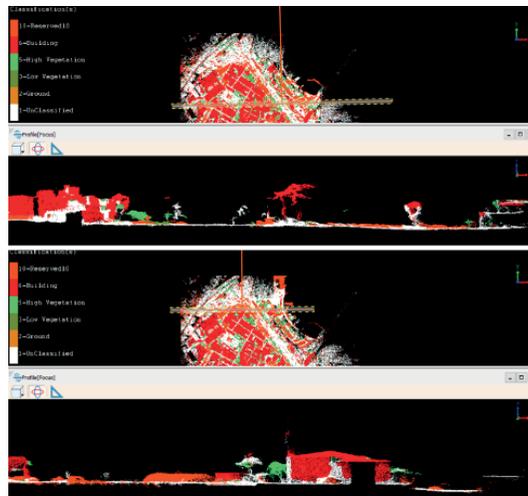


Figure 18. Point Cloud Data Classification using Machine Learning Technique.

Some accuracy control should be done to check the precision of the classification, errors can be fixed manually or by repeating the processes. Automatic classification of point cloud datasets is also provided by other software (PIX4D, Drone Deploy), but mostly are not open source, or not provided by the trial version of the software.

## DSM, DTM, NDSM

### Digital Surface Model (DSM)

Digital surface model is a three-dimensional map, it represents the maximum height of natural and build-up environment, including buildings' roofs, trees' surfaces, bridges and other above surface features. DSM can be extracted without the classification of point cloud data, the points that represents maximum height of both natural and build-up environment are all used in the generation of NDSM map. The map produced in Figure 19 shows RGB three band of elevations in Tiff format for buildings, streets, vegetation, bridges and other manmade features (Web-9, Web-10). Buildings' roofs include the slope lines, domes of historical mosques can also be observed, attached buildings are also separated with black lines. The DSM produced is used as an input for the generation of NDSM, which is a reference to buildings' heights for the 3D model generation.

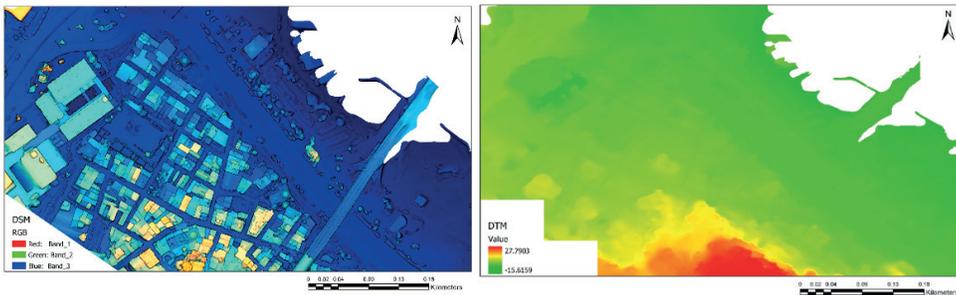


Figure 19. Digital Surface Model (DSM-DEM) (left), Digital Terrain Model (DTM) (right).

### Digital Terrain Model (DTM)

Digital Terrain model similarly is a three-dimensional map, but it represents the geographical and natural features of the ground, excluding buildings, vegetation, bridges, and other manmade features (Web-9, Web-10). DTM is extracted from classified point cloud dataset, including only ground points after excluding various points that falls under built-up environment or vegetation, the map can be extracted, see Figure 19. The produced map shown in Figure 19 shows the hilly feature of the neighbourhood ground, lowest point is shown in green falls aside to the Halic, highest points above ground can be seen in the southern part of the map. The DTM is considered as an important input, whereas terrain is a valuable input when considering 3DCM, especially when running urban analysis of built environment like visibility analysis, or other analysis regarding natural hazards like flood and earthquake. DTM also has a significant contribution as an input for the creation of NDSM, which is the reference to the absolute buildings' heights.

## Normalized Digital Surface Model (NDSM)

Normalized digital surface model is the absolute height of above ground elements, it resembles the distance between terrain surface and buildings, trees, etc. Both DTM and DSM are inputs for the production of a NDSM, where it results from subtracting DTM (Figure 19) from DSM (Figure 19) (Burdeos et al, 2015). The produced NDSM shows the heights of all above ground elements, and their absolute height above ground surface resembled in DTM. The main purpose of NDSM in the 3DCM production is giving the value of buildings' heights from ground disregarding the terrain, in order to form different city elements independent city elements, but carrying spatial relations to each other, so as to be used in various analysis or applications.

## 3D Textured Mesh Model

Also called 3D reality mesh, polygonal mesh and triangulation mesh model. Textured mesh has variable applications in filming, gaming, virtual reality, and scientific visualization (Min and Wei, 2019). 3D textured mesh is created using triangulation technique of RGB point cloud dataset, where points are connected to form the smallest geometrical element (triangles), connected together forming a polygonal mesh (Chua et al, 2017). Although the robust generated mesh model shows high detail representation of the current situation, with abilities to measure distances, areas, and volumes, the model lacks the independency of various city elements (Figure 20). The continuous mesh model generated format is OBJ, with MTL format material file attached to it. Buildings, roofs, vegetation, streets, and other man-made objects are continuously connected similar to the DSM, model is then recognized as one continuous object file, whereas the model can't be recognized as a smart city model, attributes can't be added to certain object, aside to its unmanageability and rigidity.



Figure 20. Buildings' Textured Mesh Model.

The mesh texture depends on vertices UV wrapping techniques, 2D texture is wrapped along various vertices of the model. Unlike vertex paint technique, UV texture provide higher resolution of 3D textured which are coordinated with the model, the assigned technique is so called PolyCube-Maps, depending on texture parametrization, see (Tarini et al, 2004). Mesh editing software were used to examine the ability of editing the mesh model, Blender open-source software was used for that purpose (Web-11). Blender has a wide ability for the editing of polygonal and triangulated textured meshes, some buildings were successfully separated from the created mesh, using Boolean tool given the buildings' footprint, while sustaining its vertices-based UV texture, see Yavuz Sinan mosque (Figure 21). The mosque model face counts are 7,700 faces, by using Decimate tool, planar option delimited to UVs, the face counts can be decreased while sustaining the model's texture, 2,900 face counts were found satisfactory as a result, less faces results in the distortion of the faces geometry, see Figure 21. The separated building's model at that stage can have attributes or spatial data added to the separate objects, but the model lacks the geometrical flexibility of changing parametric values like height, length, and width, which is found satisfactory in the case of historical and conservative buildings (unlike residential, commercial, etc., see Figure 21).

CityEngine software provides the ability to import either static or initial shape model in OBJ format, static models have no ability to import separate objects of the same file, objects are merged into one layer in this case, while initial shapes can be uploaded in multiple separate objects, texture has to be reassigned in this case. The best solution to handle the 3DCM is to build the model from scratch, taking in consideration the generated 3D mesh as a reference, historical and conservation buildings can be either manually modelled, or separated meshes of these buildings can be used as static model. The next chapter briefly discuss the model generation through its various procedures, model data produced and processed according to this chapter are considered to be input dataset for the model generation in the next chapter.



Figure 21. Yavuz Sinan Mosque Textured Mesh Model, 7,700 faces model (upper left), 2,900 faces model (down left). Residential Buildings' Textured Mesh Model (right).

## Pedestrian Wind Comfort Analysis

Pedestrian Wind Comfort Analysis is a Computational Fluid Dynamics (CFD) application depending on 3D models to assess wind comfort and safety in urban areas (Shi et al, 2015; Blocken et al, 2012). The main purpose behind running the simulation, is examining the ability of running urban simulation of various UAV based 3DCM. Accordingly, 3D reality textured mesh model was uploaded to a commercial based CFD analysis platform names Simulation hub. The model passed firstly took long time to be uploaded to the platform, due to its large size and the huge geometries it contains. The model passed through the first two processes of simulation, but failed in the meshing process. The reason is that running this simulation should be on closed solid surfaced polygonal masses. Since 3D textured mass model failed to run such analysis, solid mass model of least polygons was generated based on data input from point cloud database generated from UAV processing above.

Pedestrian wind comfort analysis is an urban space-based assessment, running the analysis for selective location will be less effective than entire assessment of categorized spaces (including pedestrian streets, city square, parks, etc.) (Shi et al, 2015). Wind assessment in open area thus relies mainly on the wind data provided from the wind station. Wind data collected to run the simulation were obtained from the nearest wind station to the neighbourhood (Weather station TUR\_Istanbul.170600\_IWEC), which is about 8.19 miles from the neighbourhood, see the wind rose of the data provided in Figure 22. Various pedestrian comfort criteria were developed for assessing different wind frequencies and their relation to spaces and pedestrians. Lawson (1978) criteria of wind assessment depends on calculating the average hourly wind speed and categorizing these velocities into spaces where different activities are most likely to be done in these spaces.



Figure 22. Weather station Data TUR\_Istanbul.170600\_IWEC (left), Lawson Wind Comfort Assessment Criteria (Lawson, 1978) (right).

Several aspects should be considered when running CFD wind comfort simulation, buildings models should all be included with their relative massing, the fluid outer domain should be large enough to overcome the artificial acceleration. 3DCM buildings were thus imported into Simulation hub, other city objects like vegetation couldn't be included in the model for technical concerns. Wind analysis was performed in 32 wind direction, which were then combined to assess the wind comfort according to Lawson (1978) criteria (Figure 22). Assessment plain was drawn as a circle of 1km diameter, located 1.6 meters above ground, see figure 23.



Figure 23. Wind Comfort Assessment for Yavuz Sinan Neighbourhood.

## CONCLUSION

In data collection, day and timing choice should be considered, weather status, sun exposure, sun angle is highly recommended to be checked in the pre-flight stage, camera lens suitable to the weather status will provide better image resolution and exposure. Case study choice should be highly related with the country's regulations, where sensitive areas and zones should be avoided. Following the regulations provided by the country in terms of applicability technical requirements, operation limitations, admirative procedures, and human resource requirements. Adjustment of the overlap, 60% is a default recommended by the data processing software, but may give some distortions in dense urban areas, where some streets couldn't be captured, also increasing the overlap leads to longer scan timing, where UAV endurance should be taken in consideration. The lower the flight height, the higher the detail it captures, but height limitations (minimum flight height, buildings' maximum height) should be taken in consideration. UAV choice should be dependent on its weight (which directly affects the license), endurance, range, etc. and also on its availability in the country of the case area. In Data Processing, High hardware device should be taken in consideration when running the processing of images, cloud-based software are the alternatives in case of the absence of such devices. Maximize the dependency on open-source database, or consider a cost plan in case of commercial software. Reviewing the data quality report in terms of image matchings and images overlap is highly recommended for better results.

In 3DCM Implementation, examining the OpenStreetMap database or different sources accuracy is important, as it may affect the results of the analysis. Overlapping the datasets for accuracy thus is highly recommended. Depending on data driven software in the 3DCM generation should be tested before processing, where it needs a high pre-knowledge in the script languages at some stages, also the setup of CGAL library needs a computer specialist, high storage, and high processor power. Knowing the analysis intended to be performed before 3DCM is highly recommended, so as to ignore unneeded data, which will not affect the results. In the analysis, knowing the needed and compatible data to the analysis software will save much time and effort. When depending on commercial software, cost plan is highly recommended. Open-source software were found not user friendly and need high knowledge of script language, also it lacks examinations and tutorials. Choosing the analysis software, minimum hardware requirements, and the compatible data in the pre-processing stage is highly recommended.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This study is part of the master dissertation number 609595 published in the council of higher education thesis centre (Web-12). Our deepest appreciation for the thesis committee members (Prof. Kerem KORAMAZ and Assoc. Prof. Cem BEYGO) for giving their valuable feedback and Prof. Dr. Abeer elshater for her support and valuable development thoughts and ideas through different stages. Not regarding my appreciation to Khaled Mohammad Abd El Gawad; who supported us throughout various research procedures by his complete guidance to the usage of UAV in mapping. Also, Waseem Alotybi; the visualization artist who was able to support us in 3D model editing. Another big Thanks to the UAV operator Burak Yetim for his guidance.

## REFERENCES

- Anbaroğlu, B. (2017). *Parcel Delivery in an Urban Environment Using Unmanned Aerial Systems: A Vision Paper*. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 4, 73.
- Blocken, B., Janssen, W. D., & van Hooff, T. (2012). *CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: General decision framework and case study for the Eindhoven University campus*. Environmental Modelling & Software, 30, 15-34.
- Burdeos, M., Santillan, M., & Amora, A. (2015). *Automated Building Footprints Extraction From DTM and DSM in ArcGIS*. In 36th Asian Conference on Remote Sensing (pp. 4797-4802).
- Chua, C. K., Wong, C. H., & Yeong, W. Y. (2017). *Standards, quality control, and measurement sciences in 3D printing and additive manufacturing*. Academic Press.
- Chua, C. K., Wong, C. H., & Yeong, W. Y. (2017). *Standards, quality control, and measurement sciences in 3D printing and additive manufacturing*. Academic Press.

Erenoglu, R. C., Erenoglu, O., & Arslan, N. (2018). *Accuracy Assessment of Low Cost UAV Based City Modelling for Urban Planning*. *Tehnički vjesnik*, 25(6), 1708-1714.

Fotouhi, A., Qiang, H., Ding, M., Hassan, M., Giordano, L. G., Garcia-Rodriguez, A., & Yuan, J. (2019). *Survey on uav cellular communications: Practical aspects, standardization advancements, regulation, and security challenges*. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*.

Gevaert, C., Sliuzas, R., Persello, C., & Vosselman, G. (2016). *Opportunities for UAV mapping to support unplanned settlement upgrading*. *Rwanda Journal*, 1(1S).

Koyuncu, E., & Inalhan, G. (2008, September). *A probabilistic B-spline motion planning algorithm for unmanned helicopters flying in dense 3D environments*. In 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (pp. 815-821). IEEE.

Lawson, T. V. (1978). *The wind content of the built environment*. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 3(2-3), 93-105.

Min, J., & Wei, X. (2019). *U.S. Patent No. 10,186,082*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Pehlivanoglu, Y. V. (2012). *A new vibrational genetic algorithm enhanced with a Voronoi diagram for path planning of autonomous UAV*. *Aerospace Science and Technology*, 16(1), 47-55.

Shi, X., Zhu, Y., Duan, J., Shao, R., & Wang, J. (2015). *Assessment of pedestrian wind environment in urban planning design*. *Landscape and Urban Planning*, 140, 17-28.

Tarini, M., Hormann, K., Cignoni, P., & Montani, C. (2004, August). *Polycube-maps*. In *ACM transactions on graphics (TOG)* (Vol. 23, No. 3, pp. 853-860). ACM.

Uysal, M., Toprak, A. S., & Polat, N. (2013). *Photo realistic 3d modeling with UAV: Gedik Ahmet Pasha mosque in Afyonkarahisar*. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 5, W2.

Yalçın, H., Celik, M. F., & Erten, E. (2017, May). *Detecting rooftops in 3D point clouds for solar mapping*. In 2017 25th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU) (pp. 1-4). IEEE.

Yürür, M. T., Saein, A. F., & Kaygısız, N. (2019). *What a Geologist May Do When the Geological Heritage Is in Danger?*. *Geoheritage*, 11(2), 301-308.

Web sites:

Web-1: <http://wokinfo.com>, accessed 29 June 2019.

Web-2: <https://www.scopus.com>, accessed 29 June 2019.

Web-3: <https://iha.shgm.gov.tr/public/index>>, accessed 29 June 2019.

Web-4: [http://web.shgm.gov.tr/documents/sivilhavacilik/files/mevzuat/sektorel/talimatlar/2019/IHA\\_talimati\\_revizyon3.pdf](http://web.shgm.gov.tr/documents/sivilhavacilik/files/mevzuat/sektorel/talimatlar/2019/IHA_talimati_revizyon3.pdf)>, accessed 10 December 2019.

Web-5: <https://www.dji.com/flysafe/geo-map>>, accessed 29 June 2019.

Web-6: <https://app.airmap.com>>, accessed 29 June 2019.

Web-7: <https://www.openstreetmap.org/#map=15/41.0176/28.9821>>, accessed 29 June 2019.

Web-8: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/>>, accessed 29 June 2019.

Web-9: <https://gisgeography.com/dem-dsm-dtm-differences/>>, accessed 29 June 2019.

Web-10: <http://www.gisresources.com/confused-dem-dtm-dsm/>>, accessed 29 June 2019.

Web-11: <https://www.blender.org/>>, accessed 29 June 2019.

Web-12: <https://tez.yok.gov.tr/>, accessed 15 July 2022.

# USO DO ÓLEO DE COCOS NUCIFERA PARA PRODUÇÃO DE SABÃO EM AULAS DE QUÍMICA NO ENSINO MÉDIO

*Data de submissão: 27/05/2024*

*Data de aceite: 01/07/2024*

### **Maria Paula Rodrigues da Silva Evangelista**

Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
Rio de Janeiro - RJ  
<https://encr.pw/g9COX>

### **Thaís Malcher dos Santos Costa**

Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
Instituto de Aplicação Fernando Rodrigues  
da Silveira, Departamento de Ciências da  
Natureza  
Rio de Janeiro - RJ  
<https://l1nq.com/TnuM0>

### **Fabiano Lins da Silva**

Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
Instituto de Aplicação Fernando Rodrigues  
da Silveira, Departamento de Ciências da  
Natureza  
Rio de Janeiro - RJ  
<https://l1nq.com/QtfnL>

### **Mônica Regina da Costa Marques Calderari**

Universidade do Estado do Rio de Janeiro  
Instituto de Química-Departamento de  
Química Orgânica  
Rio de Janeiro - RJ  
<https://l1nq.com/f88yF>

### **Elizabeth Teixeira de Souza**

Universidade do Estado do Rio de  
Janeiro, Instituto de Aplicação Fernando  
Rodrigues da Silveira, Departamento de  
Ciências da Natureza  
Rio de Janeiro - RJ  
<https://bityli.cc/uwD>

**RESUMO:** O Programa Internacional de Avaliação de Estudantes (PISA) em seu exame realizado em 2019, aponta que o Brasil obteve um resultado para a área de ciências de 404 pontos (abaixo da média da OCDE, que foi de 489 pontos). Estes resultados podem sugerir desafios no ensino de ciências no Brasil, como lacunas no entendimento de conceitos científicos e na aplicação de habilidades científicas em situações do mundo real. Neste âmbito a experimentação pode surgir como um instrumento para amenizar e melhorar esse resultado negativo, pois a experimentação permite que o aluno compreenda a química na prática e se sinta parte ativa do processo de aprendizagem, capacitado a fazer escolhas e expressar opiniões. Este método é crucial para o desenvolvimento do estudante, sendo complementado pelo uso de outras estratégias educativas que

estimulam a curiosidade, afastando-se das aulas tradicionais e empoderando o aluno como protagonista no processo de ensino aprendizagem. Visando tornar o ensino de química mais cativante e relevante para os alunos, este trabalho propõe uma intervenção didática que envolve a utilização de um ebook sobre sabão artesanal e uma aula experimental, com ênfase na produção de sabão com óleo de cocos nucifera pelo método “hot process”.

**PALAVRAS-CHAVE:** ensino de química, sabão artesanal, experimentação, ebook

**ABSTRACT:** The Program for International Student Assessment (PISA) in its 2019 exam showed that Brazil scored 404 points in science (below the OECD average of 489 points). These results may suggest challenges in science teaching in Brazil, such as gaps in the understanding of scientific concepts and the application of scientific skills in real-world situations. In this context, experimentation can emerge as an instrument to mitigate and improve this negative result, since experimentation allows students to understand chemistry in practice and feel that they are an active part of the learning process, able to make choices and express opinions. This method is crucial for student development and is complemented by the use of other educational strategies that stimulate curiosity, moving away from traditional classes and empowering the student as the protagonist in the teaching-learning process. In order to make chemistry teaching more engaging and relevant for students, this work proposes a didactic intervention involving the use of an ebook on handmade soap and an experimental lesson, with an emphasis on the production of coconut soap using the “hot process” method.

**KEYWORDS:** chemistry teaching, handmade soap, experimentation, ebook.

## INTRODUÇÃO

O Programa Internacional de Avaliação de Estudantes (PISA) é um estudo conduzido pela Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) que avalia o desempenho acadêmico de estudantes na faixa etária dos 15 anos (BRASIL, 2023), idade que se pressupõe a finalização da educação básica na maioria dos países do mundo. Este exame é conduzido a cada três anos e fornece uma visão abrangente do desempenho dos estudantes em três áreas principais: matemática, leitura e ciências.

O objetivo do PISA não é apenas medir o nível de conhecimento acadêmico, mas também avaliar a capacidade dos alunos de aplicar seus conhecimentos e habilidades para resolver problemas cotidianos. Isso é considerado essencial para a preparação dos alunos para as demandas da vida adulta, bem como para a participação efetiva na sociedade moderna.

Cada país que participa do PISA seleciona uma amostra representativa de estudantes de 15 anos para realizar o teste. O estudo envolve um questionário para os estudantes, professores e diretores das escolas participantes, a fim de coletar informações sobre o ambiente de aprendizado, os recursos disponíveis e as práticas educacionais. Isso ajuda a contextualizar os resultados acadêmicos e entender os fatores que podem influenciar o desempenho dos estudantes. É importante ressaltar que os dados são tratados de maneira anônima e agregada para garantir a privacidade dos estudantes das escolas participantes (PORTO, 2024).

A avaliação gera rankings e relatórios que comparam o desempenho educacional entre os países participantes, oferecendo percepções sobre os pontos fortes e fracos dos diferentes sistemas educacionais. Os resultados do PISA podem ser usados pelos governos e educadores para tomar decisões informadas sobre políticas educacionais e melhorias nos currículos escolares (PORTO, 2024).

O último PISA realizado ocorreu no ano de 2022 e seu resultado estava previsto para dezembro de 2023 (BRASIL, 2023). No exame realizado em 2019, o Brasil obteve um resultado para a área de ciências de 404 pontos (abaixo da média da OCDE, que foi de 489 pontos). Estes resultados podem sugerir desafios no ensino de ciências no Brasil, como lacunas no entendimento de conceitos científicos e na aplicação de habilidades científicas em situações do mundo real, além disso estes resultados destacam a importância de se incentivar uma abordagem mais positiva e motivada em relação ao estudo das ciências, de forma a promover a participação e o interesse dos alunos nessa área, por fim, estes podem destacar a importância de se integrar a compreensão de conceitos científicos com a capacidade de se aplicar esses conceitos em situações reais, para que os alunos desenvolvam uma compreensão mais profunda das ciências.

O método tradicional para o ensino de química ainda se faz muito presente em sala de aula, acarretando problemas como o desinteresse por parte dos alunos, pois estes concluem que a química é complexa e difícil de compreender, além disso, há uma abordagem teórica excessiva, focando apenas em conceitos abstratos, sem aplicação prática. Quando se trata do ramo da química orgânica, estes problemas se tornam mais notórios pois esta área possui uma variedade gigantesca de compostos (NETO; LIMA, 2010). O ensino de química orgânica na educação básica deve criar oportunidades para que os estudantes possam compreender, de maneira mais profunda, a composição dos materiais que os cercam diariamente (VALENTIN, 2017).

A utilização de experimentos e de um material de apoio possibilitam uma aprendizagem significativa, onde o estudante, segundo Ausubel (1980), poderá relacionar o conteúdo ao conhecimento adquirido ao longo de suas vidas, além disso o mesmo se tornará protagonista no processo de ensino-aprendizagem, participando diretamente na tomada de decisões, por exemplo.

Este trabalho propõe a utilização de um e-book, como recurso paradidático e tecnológico sobre o tema Sabão Artesanal e sugestão de uma aula experimental onde será produzido um sabão de coco de maneira artesanal com o objetivo de tornar o tema reações de saponificação mais atraente para alunos do ensino básico. Divide-se em seis seções, além desta introdução. A próxima aborda o surgimento do sabão. A segunda seção discute a reação química de formação do sabão. A terceira discute os materiais usados e a metodologia proposta. A quarta seção resume os resultados. A quinta levanta algumas discussões e a sexta e última conclui o capítulo.

## SABÃO E SEU SURGIMENTO

A arte de produzir sabão é uma das atividades mais antigas da humanidade, mencionada pelo historiador romano Plínio, o Velho (23- 79 d.C.). Embora não haja evidências documentadas, há indícios de que o sabão pode ter sido descoberto em tempos pré-históricos. É plausível que nossos antepassados, que cozinhavam carne sob o fogo, tenham notado algo curioso após fortes chuvas: uma espuma que surgia ao redor das cinzas (VERANI, 2000). Eles também podem ter percebido que a água, quando colocada em recipientes previamente usados para cozinhar carne, e por isso com cinzas, transformava-se no mesmo tipo de substância espumante. As lavadeiras, possivelmente, também notaram que os recipientes ficavam mais limpos, ou pelo menos suas mãos ficavam mais limpas do que o habitual, quando lavadas com essa água. A história do sabão remonta a civilizações antigas e suas primeiras evidências registradas datam de cerca de 2800 a.C. na antiga Babilônia. Nesse período, os habitantes da babilônia já ferviam gordura animal juntamente com cinzas, embora seu uso fosse mais voltado para pomadas e produtos de beleza do que para fins de limpeza (BORGES, 2021). No Egito, durante os banhos rituais de Cleópatra, o sabão não era utilizado. Em vez disso, óleos essenciais, leite de égua e areia fina eram empregados para limpeza. No entanto, o sabão já era conhecido, sendo uma combinação de óleos animais e vegetais com sais alcalinos (MASSI, 2019).

Segundo uma antiga lenda romana, a origem do sabão está associada ao Monte Sapo, onde rituais de sacrifício de animais eram realizados em pilhas de cremação. Quando chovia, a água arrastava uma combinação de sebo animal derretido com cinzas para o barro às margens do Rio Tibre, onde as mulheres lavavam suas roupas. Supostamente, elas perceberam que ao utilizar essa mistura de barro, as roupas ficavam significativamente mais limpas com um esforço muito menor. É possível que o termo “saponificação” (a reação química que leva à formação do sabão) tenha se originado a partir do nome desse monte (CAVITCH, 1997). Entretanto, embora os banhos públicos fossem uma parte significativa da sociedade romana, o uso do sabão como agente de limpeza corporal não era amplamente difundido. Os médicos recomendaram o sabão por suas propriedades medicinais e benefícios para a pele. Com o tempo, sua utilização no banho se popularizou, especialmente nas cidades mais importantes, como evidenciado pelas ruínas de Pompeia, onde foi descoberta uma fábrica de sabão que produzia barras deste produto.

Após o declínio do Império Romano na Europa Ocidental, a produção e uso de sabão diminuíram, ao contrário do Império Bizantino, onde o sabão era usado. Contudo, por volta do século VIII, a produção de sabão foi revivida na Itália e Espanha, seguida pela França no século XIII (VERANI, 2000). Os sabões produzidos nessas regiões eram geralmente à base de azeite de oliva, tornando-os de alta qualidade em comparação aos sabões cuja base é a gordura animal. Esses sabões, embora fossem adequados para uso na indústria têxtil, não eram apropriados para o banho.

Ainda durante o século XIII, a produção de sabão atingiu níveis considerados industriais. No início do século XIX, o químico francês Chevreul, por meio de seu extenso trabalho, desvendou a estrutura das gorduras e demonstrou que a formação do sabão era resultado de uma reação química (BORSATO, 2004). Com o tempo, uma diversidade maior de sabões passou a estar disponível à medida que, além dos óleos e cinzas, várias plantas e fragrâncias começaram a ser adicionadas. Isso levou ao desenvolvimento de produtos especializados, incluindo sabão para barba, cabelo, banho e roupas (BORGES, 2021).

No século XIX, o Movimento Sanitário em Londres levou à instalação de banheiros públicos e lavanderias, estimulando a higiene pessoal e o uso de sabonetes. Em 1806, William Colgate inaugurou a primeira fábrica de sabão nos Estados Unidos, chamada Colgate & Company, e introduziu sabonetes perfumados em 1872. Esses desenvolvimentos contribuíram para a disseminação do uso de sabão como um produto de higiene e limpeza em todo o mundo (MASSI, 2019). No Brasil, o uso do sabão tornou-se mais difundido a partir da segunda metade do século XXI.

Um marco significativo no avanço da tecnologia do sabão foi a invenção do químico belga Ernest Solvay, que utilizou sal de cozinha, comum, conhecido como cloreto de sódio, para produzir carbonato de sódio. O processo Solvay não apenas reduziu os custos da soda, mas também melhorou tanto a qualidade quanto a quantidade de soda disponível para a fabricação de sabão. Com a soda cáustica mais acessível e reativa, em contraste com a lixívia potássica obtida a partir de cinzas vegetais, as fábricas expandiram significativamente suas operações e desenvolveram processos de refino que não apenas permitiram a recuperação de glicerol, mas também aprimoraram consideravelmente a pureza do produto final (AMERICAN CLEANING INSTITUTE, 2004).

Hoje em dia, uma variedade de tipos de sabão está disponível, incluindo as versões tradicionais em barra, líquidas e em pó. Esses produtos são amplamente empregados na limpeza pessoal, higiene doméstica e em diversos setores industriais.

## A QUÍMICA DO SABÃO

A fabricação do sabão, conhecida como saponificação, é uma reação química entre gorduras ou óleos e um álcali, como hidróxido de sódio (soda cáustica - NaOH) ou hidróxido de potássio (potassa cáustica - KOH) (BORGES, 2014).

Nesse processo, as moléculas de triglicerídeos nas gorduras ou óleos são quebradas pelo álcali, liberando glicerol e ácidos graxos. Os principais constituintes do processo de saponificação são: Gorduras ou óleos: os triglicerídeos presentes nas gorduras e óleos são compostos por três moléculas de ácidos graxos ligadas a uma molécula de glicerol. Estes podem ser oriundos de gorduras animais como o sebo ou de óleos vegetais, como o azeite de oliva, óleo de palma, óleo de de óleo de cocos nucifera (óleo de coco), entre outros. Soda cáustica (hidróxido de sódio - NaOH) ou potassa cáustica (hidróxido de potássio -

KOH): esses álcalis são usados para iniciar a saponificação. A soda cáustica é usada na produção de sabão sólido, enquanto a potassa cáustica é usada na produção de sabão líquido.

O processo de saponificação ocorre, inicialmente, com a dissolução da álcali (podendo ser a soda cáustica ou a potassa cáustica) em água para que se forme uma solução alcalina. A solução alcalina é misturada com as gorduras ou óleos. Cada molécula de álcali quebra as ligações das moléculas de triglicerídeos, liberando glicerol e ácidos graxos livres. Os ácidos graxos livres, por sua vez, reagem com o álcali, formando moléculas de sabão. Essas moléculas de sabão consistem em uma parte hidrofílica (afinidade pela água) e uma parte hidrofóbica (repulsa pela água) (DELPINO, 2011). Em seguida há a liberação do glicerol que é um subproduto da saponificação. A mistura, então, é agitada e aquecida para promover a reação química. Após a saponificação, a mistura é deixada em repouso para permitir que o sabão solidifique e endureça. Durante esse período, a soda cáustica remanescente é neutralizada num processo chamado de cura. Subsequentemente ao curamento, o sabão pode ser moldado em barras, ou cortado em pedaços menores, dependendo do formato desejado. O sabão é deixado para maturar por algumas semanas, permitindo que as propriedades do sabão se estabilizem.

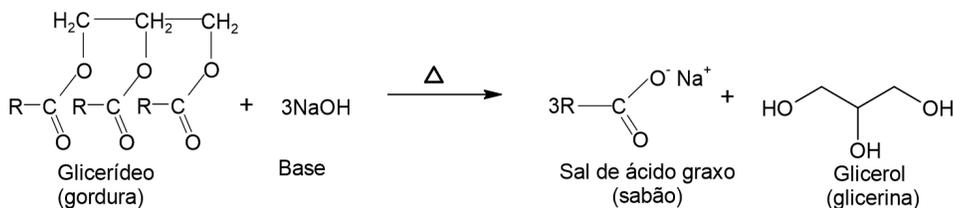


Figura 1: Reação de saponificação. Elab: autora.

A molécula que compõe o sabão pertence à categoria de compostos salinos, contendo, pelo menos, uma ligação tipicamente iônica, o que a torna polar (DELPINO, 2011). Essa polaridade, combinada com o comprimento da cadeia de carbono, não polar, permite que o sabão se dissolva tanto em substâncias polares quanto apolares, e até mesmo em ambas, simultaneamente. É essa característica que confere ao sabão sua capacidade de limpeza.

O sabão exerce seu poder de limpeza devido à sua estrutura molecular anfifílica, que contém uma parte hidrofóbica (repelente de água) e uma parte hidrofílica (atraída pela água). Quando aplicado a superfícies sujas, as moléculas de sabão organizam-se de forma a criar estruturas chamadas micelas.

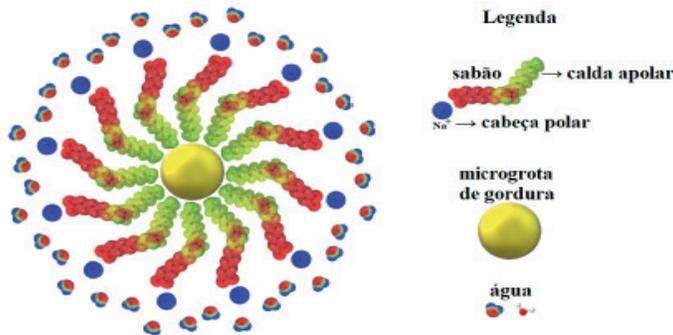


Figura 2 - Representação da formação de uma micela. Fonte: BORGES, 2021.

A parte hidrofóbica do sabão liga-se às partículas de gordura e sujeira, enquanto a parte hidrofílica fica voltada para fora, em direção à água. Isso envolve as partículas de sujeira em micelas, mantendo-as suspensas na água. Graças a essa estrutura, as micelas permitem que a sujeira seja removida da superfície e suspensa na água. Quando você enxágua, as micelas carregam as partículas de sujeira consigo, efetivamente limpando a superfície. Além disso, o sabão reduz a tensão superficial da água, permitindo que ela se espalhe uniformemente sobre a superfície, garantindo uma limpeza mais eficiente. Portanto, o sabão age como um agente de limpeza eficaz, tornando a sujeira solúvel em água e facilitando sua remoção.

## MATERIAIS E MÉTODO PROPOSTO

O trabalho propõe a utilização de um E-Book como material complementar sobre o sabão artesanal elaborado pela autora e uma aula experimental (Link de acesso: <https://pedroejoaeditores.com.br/produto/explorando-a-quimica-do-sabao-artesanal-um-guia-didatico-para-aprender-ciencias-na-pratica/>). Esta aula terá duração de 4 tempos de 50 minutos cada (sendo 2 tempos para cada dia, totalizando 2 aulas) e será sobre o tema reação de saponificação (cold process). Esta poderá ser aplicada em qualquer turma do Ensino Médio, pois é um tema versátil e que o professor poderá encaixar em seu plano de aula conforme a matéria dada naquele período.

Aproximadamente duas semanas antes, os alunos receberão, por e-mail, ou poderão acessar por meio de um QR-Code disponibilizado em sala de aula, o acesso para o E-Book, com este material os educandos poderão aprender, previamente, o que será abordado nas próximas aulas, com isto, o mesmo poderá criar dúvidas ou acrescentar alguma curiosidade que este saiba e que não esteja no E-book.

O primeiro dia de aula será uma roda de conversa, a respeito do que eles entenderam ao ler o E-Book, tirar dúvidas, etc, isto seria feito no primeiro tempo. No segundo tempo, o professor irá explicar a reação de saponificação podendo este já fazer a conexão com a matéria que desejar, de acordo com o ano da turma.

No segundo dia, será realizada a prática experimental, a turma será dividida em, aproximadamente, 7 grupos, com 4 alunos cada. Antes do início da prática, é importante comentar com os alunos sobre os perigos dos materiais que serão utilizados, como o óleo quente e a soda cáustica, a fim de alertar os mesmos sobre a segurança no laboratório.

Os materiais e reagentes disponíveis para cada grupo utilizar serão: 228 g de óleo de cocos nucifera, 100 g de água destilada, 33 g de soda cáustica, 9 g de óleo essencial, balança, recipiente de plástico (tamanho médio), béquer de diferentes tamanhos e volumes, mixer, espátula de borracha, fôrma para preparo de sabão, papel manteiga, toalha, tábua de madeira, termômetro, placa de aquecimento, papel indicador de pH.

Sendo o procedimento experimental feito da seguinte forma: **(1)** coloque o óleo de cocos nucifera para aquecer em banho maria até, aproximadamente, 95°C e 105°C; **(2)** prepare a lixívia misturando a soda cáustica na água, mexa por uns 10 segundos, apenas para solubilizar os cristais de soda cáustica, NÃO espere esta ficar cristalina; **(3)** adicione a solução de hidróxido de sódio na vasilha dos óleos; **(4)** com o mixer ou fuet, bata por, aproximadamente, 1 (um) minuto até os óleos e a solução de hidróxido estiverem misturados, continuar mixando até a mistura ficar com um aspecto de purê que será a finalização da saponificação; **(5)** meça o pH, com o auxílio das fitas; **(6)** coloque a massa na forma e decore como quiser. A Figura 3 apresenta algumas partes do processo até o resultado final da fórmula desenvolvida.



**(3)**



**(4)**



**(4)**



**(6)**



**(6)**

Figura 3: Algumas etapas da produção de acordo com o procedimento experimental. Elab: autora.

## RESULTADOS

Os resultados esperados são diversos. Pretende-se com o uso da experimentação vinculada ao uso de material complementar (E-book) que os alunos consigam reconhecer a Química como um instrumento para se viver melhor, com mais qualidade, saúde em sociedade, além de entenderem que a produção artesanal gera produtos que são ambientalmente amigáveis.

Espera-se também que a experimentação gere um ambiente descontraído e investigativo, a fim de tornar a aprendizagem mais atraente, e preparar os alunos para se tornarem cidadãos críticos e engajados capazes de analisar problemas complexos, buscar soluções inovadoras e contribuir de maneira significativa para a sociedade.

Por fim, espera-se desenvolver o senso de pertencimento e o ímpeto de cuidar não só da escola que frequenta, mas também da comunidade que mora, bem como do mundo que vive.

## DISCUSSÃO

Neste tópico serão abordados possíveis temas que podem ser discutidos e aprofundados em sala de aula pelo professor, além disso, o quadro abaixo sugere alguns temas que podem ser abordados nas aulas de química de acordo com o ano da turma.

Ano de escolaridade	Tópicos
<b>1° série do Ensino Médio</b>	Relações numéricas: Massa atômica e molecular, mol; Tipos de fórmulas químicas; Geometria molecular; Polaridade; Interações Intermoleculares.
<b>2° série do Ensino Médio</b>	Funções Orgânicas; Soluções/Diluição; Unidades de concentração; Misturas; Classificação de Carbono e cadeia.
<b>3° série do Ensino Médio</b>	Biomoléculas; Saponificação; Misturas.

Quadro 1 - Tópicos da química para serem abordados no Ensino Médio.

O professor poderá elaborar um relatório com o passo a passo do procedimento experimental e algumas questões teóricas relacionadas ao tema da química escolhido de acordo com a série trabalhada, relacionado a prática, para que os alunos respondam em grupo e poderá usar como um instrumento avaliativo do bimestre.

Pode-se inferir que a aula experimental sobre a produção de sabão de óleo de cocos nucifera, tem como objetivo promover a compreensão de conceitos químicos, destacando a importância crucial da experimentação no processo de ensino e aprendizagem de química. Abordamos o conteúdo de maneira dinâmica, facilitando a construção do conhecimento por meio da prática. Espera-se atingir um desempenho positivo e a participação dos alunos, incentivando a reflexão e análise dos conceitos estudados, estimulando a curiosidade e despertando a criticidade.

## CONCLUSÕES

O presente trabalho fundamentou-se na proposta de implementação de um material paradidático (ebook) e na proposta de implementação de uma atividade experimental envolvendo a produção de sabão de óleo de cocos nucifera de forma artesanal. O objetivo será evidenciar a importância de se aplicar metodologias inovadoras que explorem conceitos associados ao dia a dia dos discentes. Pretende-se proporcionar um ambiente escolar mais cativante aos alunos, promovendo novas experiências individuais e em grupo, estimulando a transição de uma postura passiva para ativa no processo de ensino-aprendizagem.

Além disso, destacar a importância da integração dos conteúdos escolares com a vida dos estudantes, pois Isso permite que compreendam a relevância e aplicabilidade do que aprendem na escola, capacitando-os a enfrentar desafios reais e sociais embasados em conhecimentos científicos. Além disso, é essencial que a escola promova formação de indivíduos preparados tanto para a convivência social quanto para ingressar no mercado de trabalho.

A proposta de aplicação do ebook previamente à aula pretende despertar o interesse dos alunos a respeito do tema e permitir que os mesmos cheguem à aula sabendo a respeito do tema e sanando possíveis dúvidas. Além disso, este material possui outros tipos de sabão que os mesmos podem reproduzir em casa.

Espera-se que a produção do sabão desperte a importância de se trabalhar em grupo e os cuidados que devem ser tomados ao se utilizar certas substâncias, como o hidróxido de sódio, os alunos também levantaram questões como produzir sabão para os banheiros do próprio colégio, validando o lado social e o protagonismo do alunado em resolver um problema da escola.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN CLEANING INSTITUTE: **Soaps & Detergent: Prehistoric to Middle Ages**, 2014.

Disponível em: < [http://www.cleaninginstitute.org/clean\\_living/soaps\\_\\_detergent\\_history.aspx](http://www.cleaninginstitute.org/clean_living/soaps__detergent_history.aspx) > Acesso em 16/10/2023.

BORGES, B. R.; NEIVA, D.P.; DIAS, E. C. C.; ROCHA, K. O. **Determinação da Ordem de Saponificação do Acetato de Etila**. ResearchGate, 2014.

BORGES, R, COLOMBO, K., FAVERO, T., BORGES, J.H., **Uma visão multi e interdisciplinar a partir da prática de saponificação**, Química nova na escola, São Paulo, 43, 3, p. 305-314, 2021.

BORSATO, D.; GALÃO, O. F.; MOREIRA, I. **Detergentes Naturais e Sintéticos: Um guia Técnico**. 2a edição. Londrina. Universidade Estadual de Londrina, 2004. Edição Revisada.

BRASIL. Ministério da Educação. Disponível em <<https://www.gov.br/inep/pt-br/assuntos/noticias/acoes-internacionais/pisa-2022-avali-ou-mais-de-80-dos-participantes-da-amostra>> Acesso em 26/08/2023.

CAVITCH, S. M. **The soap maker's Companion: A comprehensive guide with recipes, techniques & know how**, 1. Ed. North Adams: Storey publishing, 1997.

DELPINO, J.C.; NETO, O.G.Z. **Trabalhando a química dos sabões e detergentes**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Instituto de Química, 2011.

MASSI, L., JUNIOR, C. S. L., **Produção de sabão no assentamento rural monte alegre: Aspectos didáticos, sociais, culturais e ambientais**, Química nova na escola, São Paulo, 41, 2, p. 124-132, 2019.

NETO, A. A.; LIMA, F. G. **Fundamentos de Administração Financeira**. São Paulo: Atlas S.A, p. 376, 2010.

PORTO, P. A. QUEIROZ, S. L. Pisa 2022: **Brasil segue no pelotão de trás**. Química nova na escola, São Paulo, 46, 1, p. 3-4, 2024.

VALENTIM, J.A. **Extração de óleos essenciais por arraste a vapor: sequência didática para proporcionar aprendizagem de conceitos de Química**. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências Naturais). Universidade Federal do Mato Grosso, 2017.

VERANI, C. N., GONÇALVES, D. R., NASCIMENTO, M.G. **Sabões e detergentes como tema organizador de aprendizagens no ensino médio**, Química nova na escola, São Paulo ,12, 15-19, 2000.

**MARIANA NATALE FIORELLI FABICHE:** Graduada em Engenharia Civil pela Universidade Paranaense. Possui especialização em Gestão de Projetos e Obras de Edificações pela Universidade Estadual de Maringá. Mestre em Engenharia Urbana pela Universidade Estadual de Maringá e Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Londrina. Atualmente (2021- Atual) é professora do Departamento de Tecnologia (DTC) nos cursos de Engenharia Civil e Tecnologia da Construção Civil da Universidade Estadual de Maringá Campus de Umuarama, lecionando disciplinas de Conforto térmico, Hidrologia, Hidráulica I, Laboratório de Hidráulica I e II, Materiais de Construção, Gerenciamento de Obras, entre outras. Participa de projetos de pesquisa e contribui para o desenvolvimento dos respectivos cursos.

**ALINE NAIARA ZITO:** Graduada em Engenharia civil pela Universidade Estadual de Maringá. Mestre pelo programa de Engenharia Urbana (PEU) da Universidade Estadual de Maringá. Especialista em perícia e avaliação de imóveis. Atua como professora colaboradora do Departamento de Tecnologia (DTC) nos cursos de Engenharia Civil e Tecnologia da Construção Civil da Universidade Estadual de Maringá Campus de Umuarama. Desenvolve pesquisa com o tema de Concreto Autocicatrizante. Participa de projetos de pesquisa e contribui para o desenvolvimento dos respectivos cursos da UEM – campus de Umuarama.

**A**

Aço-carbono 235

Afluentes 1, 3, 4, 5, 8, 9, 10

Análise do conforto do vento para pedestres 235

Aplicação industrial 235

Aprendizado de máquina 147, 148, 151, 153, 154, 156

**B**

Balança 159, 161, 162, 164, 171, 172, 173, 174, 179, 181, 230

**C**

Cálculo de campos 183

Cana de açúcar 235

Celulose 107, 109, 114, 115, 117, 118, 119

Controle de processo 124, 125

**D**

Drenagem urbana 63, 64

**E**

Efluentes 1, 2, 3, 4, 5, 8, 9, 10

Energia nuclear 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144

Engenharia biomédica 12, 13, 14, 15

Ensino de química 224, 225

Experimentação 223, 224, 231

**H**

Hemodiálise 159, 160, 165, 167, 169, 171

**I**

Indústria 4.0 52

Indutor de corrente alternada 183

Integração Latino-Americana 133, 134, 140, 141, 143

Integral de linha 183

Integral de superfícies 235

Inteligência artificial 12, 13, 14, 15, 147, 150, 151, 155

Interação humano-robô 147, 153, 154, 155, 157

Inundação urbana 63, 65

**L**

Lodo 1, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11

**M**

Manufatura aditiva 52, 53, 54, 57, 62

Metais 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 53, 78, 162

Microestrutura 58

Modelos 3D da cidade 236

Mulheres 133, 134, 137, 138, 139, 142, 143, 226

**N**

Nanofluido 77, 78, 80, 81, 87, 88, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96

**O**

Ontologia 12, 14

Óxido de grafeno 77, 78, 80, 81, 87, 90, 91, 93, 94, 95, 96

**P**

Pesagem 159, 160, 161, 162, 165, 169, 170, 171, 173, 176, 179, 181

Projeto de produto 236

Protótipo 159, 160, 161, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 174, 175, 176, 178, 179, 180, 181

**R**

Resistência ao CO<sub>2</sub> 235

Robótica cognitiva 145, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158

**S**

Sabão artesanal 224, 225, 229

Sedimentos 1, 2, 3, 10

Simulação e modelagem 124

Soldagem a arco 52, 53, 58

Sustentabilidade 53

**T**

Taxas de deformação 235

Termossifão 77, 78, 79, 80, 81, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95

Trocador de calor casco e tubo 124, 128, 129

# Engenharias em perspectiva

ciência, tecnologia e inovação

# 2

-  [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)
-  [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)
-  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
-  [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)

# Engenharias em perspectiva

ciência, tecnologia e inovação

# 2

-  [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)
-  [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)
-  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
-  [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)