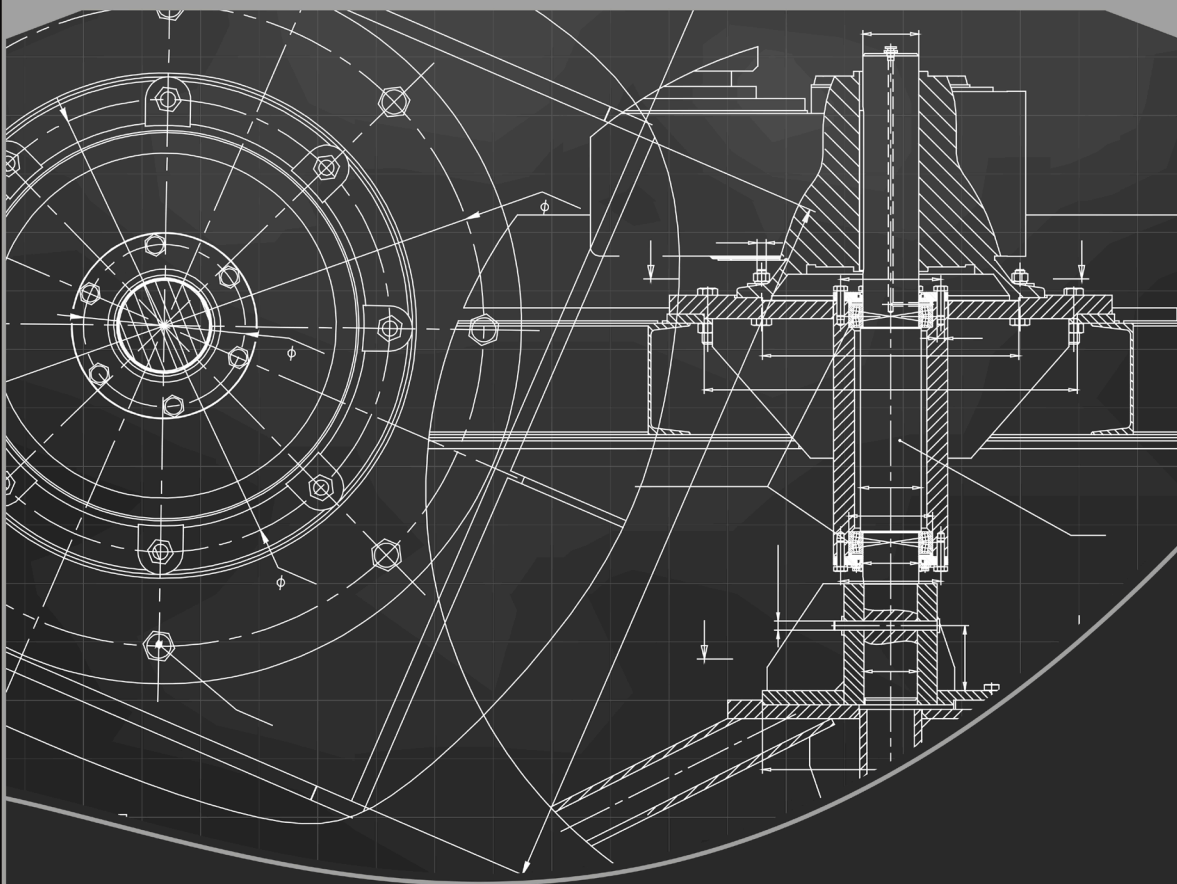


# Engenharia mecânica:

A influência de máquinas, ferramentas  
e motores no cotidiano do homem

2

**Henrique Ajuz Holzmann**  
**João Dallamuta**  
(Organizadores)



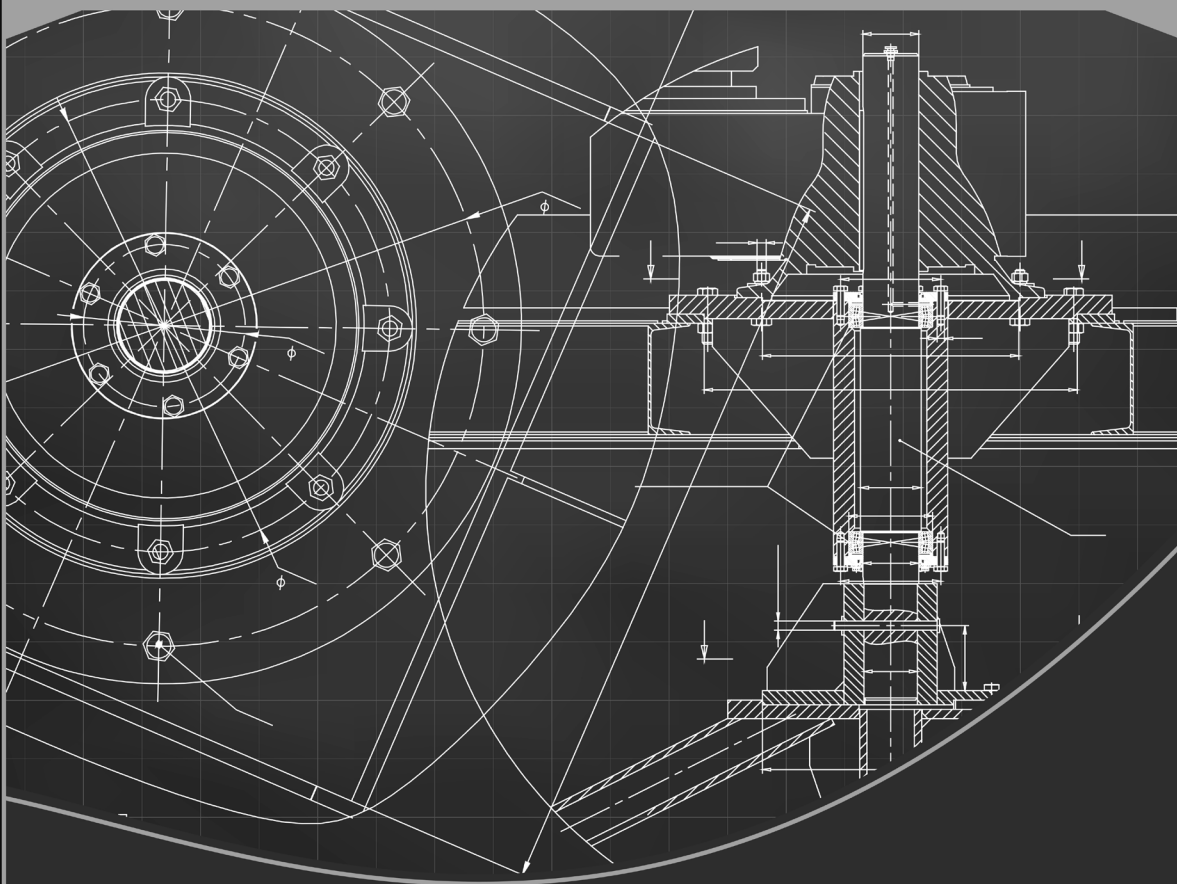
**Atena**  
Editora  
Ano 2021

# Engenharia mecânica:

A influência de máquinas, ferramentas  
e motores no cotidiano do homem

2

**Henrique Ajuz Holzmann**  
**João Dallamuta**  
(Organizadores)



**Atena**  
Editora  
Ano 2021

### **Editora Chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

### **Assistentes Editoriais**

Natalia Oliveira

Bruno Oliveira

Flávia Roberta Barão

### **Bibliotecária**

Janaina Ramos

### **Projeto Gráfico e Diagramação**

Natália Sandrini de Azevedo

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

### **Imagens da Capa**

Shutterstock

### **Edição de Arte**

Luiza Alves Batista

### **Revisão**

Os Autores

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2021 Os autores

Copyright da Edição © 2021 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.



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 Humanas e Sociais Aplicadas**

Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná

Prof. Dr. Américo Junior Nunes da Silva – Universidade do Estado da Bahia

Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais

Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília

Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense  
 Prof. Dr. Crisóstomo Lima do Nascimento – Universidade Federal Fluminense  
 Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
 Prof. Dr. Daniel Richard Sant'Ana – Universidade de Brasília  
 Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia  
 Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Dilma Antunes Silva – Universidade Federal de São Paulo  
 Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá  
 Prof. Dr. Elson Ferreira Costa – Universidade do Estado do Pará  
 Prof. Dr. Elói Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima  
 Prof. Dr. Gustavo Henrique Cepolini Ferreira – Universidade Estadual de Montes Claros  
 Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionale delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
 Prof. Dr. Jadson Correia de Oliveira – Universidade Católica do Salvador  
 Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
 Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
 Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros  
 Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
 Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Pontifícia Universidade Católica de Campinas  
 Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Maria Luzia da Silva Santana – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
 Prof. Dr. Pablo Ricardo de Lima Falcão – Universidade de Pernambuco  
 Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
 Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
 Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador  
 Prof. Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares – Universidade Federal do Piauí  
 Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
 Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
 Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Vanessa Ribeiro Simon Cavalcanti – Universidade Católica do Salvador  
 Prof. Dr. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
 Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

#### **Ciências Agrárias e Multidisciplinar**

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano  
 Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará  
 Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás  
 Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Carla Cristina Bauermann Brasil – Universidade Federal de Santa Maria  
 Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados  
 Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia  
 Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa  
 Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
 Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará  
 Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
 Prof. Dr. Jael Soares Batista – Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
 Prof. Dr. Jayme Augusto Peres – Universidade Estadual do Centro-Oeste  
 Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
 Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará  
 Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa  
 Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
 Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
 Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
 Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido  
 Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas



## **Ciências Biológicas e da Saúde**

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília  
Profª Drª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás  
Profª Drª Daniela Reis Joaquim de Freitas – Universidade Federal do Piauí  
Profª Drª Débora Luana Ribeiro Pessoa – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Douglas Siqueira de Almeida Chaves – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri  
Profª Drª Elizabeth Cordeiro Fernandes – Faculdade Integrada Medicina  
Profª Drª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília  
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina  
Profª Drª Eysler Gonçalves Maia Brasil – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira  
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Profª Drª Fernanda Miguel de Andrade – Universidade Federal de Pernambuco  
Prof. Dr. Fernando Mendes – Instituto Politécnico de Coimbra – Escola Superior de Saúde de Coimbra  
Profª Drª Gabriela Vieira do Amaral – Universidade de Vassouras  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Helio Franklin Rodrigues de Almeida – Universidade Federal de Rondônia  
Profª Drª Iara Lúcia Tescarollo – Universidade São Francisco  
Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. Jefferson Thiago Souza – Universidade Estadual do Ceará  
Prof. Dr. Jesus Rodrigues Lemos – Universidade Federal do Piauí  
Prof. Dr. Jônatas de França Barros – Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof. Dr. Luís Paulo Souza e Souza – Universidade Federal do Amazonas  
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Profª Drª Maria Tatiane Gonçalves Sá – Universidade do Estado do Pará  
Profª Drª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federacl do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá  
Prof. Dr. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados  
Profª Drª Regiane Luz Carvalho – Centro Universitário das Faculdades Associadas de Ensino  
Profª Drª Renata Mendes de Freitas – Universidade Federal de Juiz de Fora  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Welma Emidio da Silva – Universidade Federal Rural de Pernambuco

## **Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto  
Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie  
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 – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás  
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  
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho  
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande

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  
 Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba  
 Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
 Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas  
 Prof. Dr. Sidney Gonçalves de Lima – Universidade Federal do Piauí  
 Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

### **Linguística, Letras e Artes**

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins  
 Profª Drª Angeli Rose do Nascimento – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro  
 Profª Drª Carolina Fernandes da Silva Mandaji – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
 Profª Drª Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará  
 Profª Drª Edna Alencar da Silva Rivera – Instituto Federal de São Paulo  
 Profª Drª Fernanda Tonelli – Instituto Federal de São Paulo,  
 Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões  
 Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
 Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná  
 Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará  
 Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste  
 Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia

### **Conselho Técnico Científico**

Prof. Me. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo  
 Prof. Me. Adalberto Zorzo – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza  
 Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba  
 Prof. Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva – Universidade para o Desenvolvimento do Alto Vale do Itajaí  
 Profª Ma. Adriana Regina Vettorazzi Schmitt – Instituto Federal de Santa Catarina  
 Prof. Dr. Alex Luis dos Santos – Universidade Federal de Minas Gerais  
 Prof. Me. Alexsandro Teixeira Ribeiro – Centro Universitário Internacional  
 Profª Ma. Aline Ferreira Antunes – Universidade Federal de Goiás  
 Profª Drª Amanda Vasconcelos Guimarães – Universidade Federal de Lavras  
 Prof. Me. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão  
 Profª Ma. Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa  
 Profª Drª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico  
 Profª Drª Andreza Miguel da Silva – Faculdade da Amazônia  
 Profª Ma. Anelisa Mota Gregoleti – Universidade Estadual de Maringá  
 Profª Ma. Anne Karynne da Silva Barbosa – Universidade Federal do Maranhão  
 Prof. Dr. Antonio Hot Pereira de Faria – Polícia Militar de Minas Gerais  
 Prof. Me. Armando Dias Duarte – Universidade Federal de Pernambuco  
 Profª Ma. Bianca Camargo Martins – UniCesumar  
 Profª Ma. Carolina Shimomura Nanya – Universidade Federal de São Carlos  
 Prof. Me. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
 Prof. Me. Carlos Augusto Zilli – Instituto Federal de Santa Catarina  
 Prof. Me. Christopher Smith Bignardi Neves – Universidade Federal do Paraná  
 Profª Drª Cláudia de Araújo Marques – Faculdade de Música do Espírito Santo  
 Profª Drª Cláudia Taís Siqueira Cagliari – Centro Universitário Dinâmica das Cataratas  
 Prof. Me. Clécio Danilo Dias da Silva – Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
 Prof. Me. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará  
 Profª Ma. Daniela da Silva Rodrigues – Universidade de Brasília  
 Profª Ma. Daniela Remião de Macedo – Universidade de Lisboa

Profª Ma. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco  
Prof. Me. Douglas Santos Mezacas – Universidade Estadual de Goiás  
Prof. Me. Edevaldo de Castro Monteiro – Embrapa Agrobiologia  
Prof. Me. Edson Ribeiro de Britto de Almeida Junior – Universidade Estadual de Maringá  
Prof. Me. Eduardo Gomes de Oliveira – Faculdades Unificadas Doctum de Cataguases  
Prof. Me. Eduardo Henrique Ferreira – Faculdade Pitágoras de Londrina  
Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil  
Prof. Me. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita  
Prof. Me. Ernane Rosa Martins – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás  
Prof. Me. Euvaldo de Sousa Costa Junior – Prefeitura Municipal de São João do Piauí  
Prof. Dr. Everaldo dos Santos Mendes – Instituto Edith Theresa Hedwing Stein  
Prof. Me. Ezequiel Martins Ferreira – Universidade Federal de Goiás  
Profª Ma. Fabiana Coelho Couto Rocha Corrêa – Centro Universitário Estácio Juiz de Fora  
Prof. Me. Fabiano Eloy Atilio Batista – Universidade Federal de Viçosa  
Prof. Me. Felipe da Costa Negrão – Universidade Federal do Amazonas  
Prof. Me. Francisco Odécio Sales – Instituto Federal do Ceará  
Prof. Me. Francisco Sérgio Lopes Vasconcelos Filho – Universidade Federal do Cariri  
Profª Drª Germana Ponce de Leon Ramírez – Centro Universitário Adventista de São Paulo  
Prof. Me. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária  
Prof. Me. Givanildo de Oliveira Santos – Secretaria da Educação de Goiás  
Prof. Dr. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Me. Gustavo Krahel – Universidade do Oeste de Santa Catarina  
Prof. Me. Helton Rangel Coutinho Junior – Tribunal de Justiça do Estado do Rio de Janeiro  
Profª Ma. Isabelle Cerqueira Sousa – Universidade de Fortaleza  
Profª Ma. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia  
Prof. Me. Javier Antonio Albornoz – University of Miami and Miami Dade College  
Prof. Me. Jhonatan da Silva Lima – Universidade Federal do Pará  
Prof. Dr. José Carlos da Silva Mendes – Instituto de Psicologia Cognitiva, Desenvolvimento Humano e Social  
Prof. Me. Jose Elyton Batista dos Santos – Universidade Federal de Sergipe  
Prof. Me. José Luiz Leonardo de Araujo Pimenta – Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria Uruguay  
Prof. Me. José Messias Ribeiro Júnior – Instituto Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco  
Profª Drª Juliana Santana de Curcio – Universidade Federal de Goiás  
Profª Ma. Juliana Thaisa Rodrigues Pacheco – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Kamilly Souza do Vale – Núcleo de Pesquisas Fenomenológicas/UFGA  
Prof. Dr. Kárpio Márcio de Siqueira – Universidade do Estado da Bahia  
Profª Drª Karina de Araújo Dias – Prefeitura Municipal de Florianópolis  
Prof. Dr. Lázaro Castro Silva Nascimento – Laboratório de Fenomenologia & Subjetividade/UFPR  
Prof. Me. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Ma. Lilian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará  
Profª Ma. Lilian de Souza – Faculdade de Tecnologia de Itu  
Profª Ma. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ  
Profª Drª Livia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás  
Prof. Dr. Lucio Marques Vieira Souza – Secretaria de Estado da Educação, do Esporte e da Cultura de Sergipe  
Prof. Dr. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual do Paraná  
Profª Ma. Luana Ferreira dos Santos – Universidade Estadual de Santa Cruz  
Profª Ma. Luana Vieira Toledo – Universidade Federal de Viçosa  
Prof. Me. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados  
Prof. Me. Luiz Renato da Silva Rocha – Faculdade de Música do Espírito Santo  
Profª Ma. Luma Sarai de Oliveira – Universidade Estadual de Campinas  
Prof. Dr. Michel da Costa – Universidade Metropolitana de Santos

Prof. Me. Marcelo da Fonseca Ferreira da Silva – Governo do Estado do Espírito Santo  
Prof. Dr. Marcelo Máximo Purificação – Fundação Integrada Municipal de Ensino Superior  
Prof. Me. Marcos Aurelio Alves e Silva – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo  
Profª Ma. Maria Elanny Damasceno Silva – Universidade Federal do Ceará  
Profª Ma. Marileila Marques Toledo – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri  
Prof. Dr. Pedro Henrique Abreu Moura – Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais  
Prof. Me. Pedro Panhoca da Silva – Universidade Presbiteriana Mackenzie  
Profª Drª Poliana Arruda Fajardo – Universidade Federal de São Carlos  
Prof. Me. Rafael Cunha Ferro – Universidade Anhembi Morumbi  
Prof. Me. Ricardo Sérgio da Silva – Universidade Federal de Pernambuco  
Prof. Me. Renan Monteiro do Nascimento – Universidade de Brasília  
Prof. Me. Renato Faria da Gama – Instituto Gama – Medicina Personalizada e Integrativa  
Profª Ma. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal  
Prof. Me. Robson Lucas Soares da Silva – Universidade Federal da Paraíba  
Prof. Me. Sebastião André Barbosa Junior – Universidade Federal Rural de Pernambuco  
Profª Ma. Silene Ribeiro Miranda Barbosa – Consultoria Brasileira de Ensino, Pesquisa e Extensão  
Profª Ma. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo  
Profª Ma. Taiane Aparecida Ribeiro Nepomoceno – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Prof. Me. Tallys Newton Fernandes de Matos – Faculdade Regional Jaguaribana  
Profª Ma. Thatianny Jasmine Castro Martins de Carvalho – Universidade Federal do Piauí  
Prof. Me. Tiago Silvio Dedoné – Colégio ECEL Positivo  
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

## Engenharia mecânica: a influência de máquinas, ferramentas e motores no cotidiano do homem 2

**Bibliotecária:** Janaina Ramos  
**Diagramação:** Luiza Alves Batista  
**Correção:** Mariane Aparecida Freitas  
**Edição de Arte:** Luiza Alves Batista  
**Revisão:** Os Autores  
**Organizadores:** Henrique Ajuz Holzmann  
João Dallamuta

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E57 Engenharia mecânica: a influência de máquinas, ferramentas e motores no cotidiano do homem 2 / Organizadores Henrique Ajuz Holzmann, João Dallamuta. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2021.

Formato: PDF  
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader  
Modo de acesso: World Wide Web  
Inclui bibliografia  
ISBN 978-65-5983-117-3  
DOI 10.22533/at.ed.173211806

1. Engenharia mecânica. I. Holzmann, Henrique Ajuz (Organizador). II. Dallamuta, João (Organizador). III. Título.  
CDD 621

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

**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.

## APRESENTAÇÃO

A Engenharia Mecânica pode ser definida como o ramo da engenharia que aplica os princípios de física e ciência dos materiais para a concepção, análise, fabricação e manutenção de sistemas mecânicos. O aumento no interesse por essa área se dá principalmente pela escassez de matérias primas, a necessidade de novos materiais que possuam melhores características físicas e químicas e a necessidade de reaproveitamento dos resíduos em geral.

Nos dias atuais a busca pela redução de custos, aliado a qualidade final dos produtos é um marco na sobrevivência das empresas, reduzindo o tempo de execução e a utilização de materiais.

Neste livro são apresentados trabalho teóricos e práticos, relacionados a área de mecânica e materiais, dando um panorama dos assuntos em pesquisa atualmente. A caracterização dos materiais é de extrema importância, visto que afeta diretamente aos projetos e sua execução dentro de premissas técnicas e econômicas.

De abordagem objetiva, a obra se mostra de grande relevância para graduandos, alunos de pós-graduação, docentes e profissionais, apresentando temáticas e metodologias diversificadas, em situações reais. Sendo hoje que utilizar dos conhecimentos científicos de uma maneira eficaz e eficiente é um dos desafios dos novos engenheiros

Boa leitura

Henrique Ajuz Holzmann

João Dallamuta



## SUMÁRIO

### **CAPÍTULO 1..... 1**

#### **ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA DE UTILIZAÇÃO DA FIBRA DE BANANEIRA COM RESINA SINTÉTICA EM COMPÓSITOS**

Rúi Carlos de Sousa Mota

José Ubiragi de Lima Mendes

**DOI 10.22533/at.ed.1732118061**

### **CAPÍTULO 2..... 18**

#### **CARACTERIZAÇÃO DA BORRA DE PIAÇAVA (*ATTALEA FUNIFERA*) PARA PRODUÇÃO DE BRIQUETES**

Alexandre Silva de Moraes

Vitor da Silva Lacerda

Alberto Matheus Freitas Oliveira

Ana Claudia Rangel da Conceição

Carlos Alberto França Junior

Victor Antunes Silva Barbosa

Mirtânia Antunes Leão

**DOI 10.22533/at.ed.1732118062**

### **CAPÍTULO 3..... 34**

#### **STRUCTURAL OPTIMIZATION OF A NOSE LANDING GEAR FOR CESSNA 172 AIRPLANE**

Raphael Basilio Pires Nonato

Alexander Dias Lopes

**DOI 10.22533/at.ed.1732118063**

### **CAPÍTULO 4..... 49**

#### **AVALIAÇÃO DO GRAU DE SENSITIZAÇÃO E O APARECIMENTO DE FASES INTERMETÁLICAS EM TRECHO DE TUBULAÇÃO DE FORNO DE COQUEAMENTO RETARDADO**

Thiago Batista David

Erike Wilker Arruda Figueredo

Fillipe Stephany de Souza Virgolino

Luiz Adeildo da Silva Junior

Moisés Euclides da Silva Junior

**DOI 10.22533/at.ed.1732118064**

### **CAPÍTULO 5..... 60**

#### **FABRICAÇÃO DA LIGA DE ALUMÍNIO AA7013 ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE METALURGIA DO PÓ**

Enéas Carlos de Oliveira Silva

Eduardo José Silva

Thiago Batista David

Moisés Euclides da Silva Junior

Oscar Olimpio de Araujo Filho

**DOI 10.22533/at.ed.1732118065**

**CAPÍTULO 6..... 78**

**FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA LIGA DE ALUMÍNIO AA7009 ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE METALURGIA DO PÓ**

Enéas Carlos de Oliveira Silva  
Eduardo José Silva  
Thiago Batista David  
Moisés Euclides da Silva Junior  
Oscar Olimpio de Araujo Filho

**DOI 10.22533/at.ed.1732118066**

**CAPÍTULO 7..... 96**

**FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA LIGA DE ALUMÍNIO AA8011 ATRAVÉS DAS TÉCNICAS DE METALURGIA DO PÓ**

Sandra Torres Zarzar  
Diogo Monteiro do Nascimento  
José Endreo Baracho da Costa  
Moisés Euclides da Silva Junior  
Oscar Olimpio de Araujo Filho

**DOI 10.22533/at.ed.1732118067**

**CAPÍTULO 8..... 111**

**METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DE CUSTOS ASSOCIADOS À APLICAÇÃO DE SOLDAGEM EM TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS**

Wagner Gutemberg Cavalcanti da Silva  
Felipe Leandro dos Santos  
Helen Rodrigues Araújo  
Marcio Rolemberg Freire  
Moisés Euclides da Silva Junior

**DOI 10.22533/at.ed.1732118068**

**CAPÍTULO 9..... 126**

**APLICAÇÃO DE MQL NO TORNEAMENTO DO AÇO SAE 4340 COM INSERTO DE METAL DURO TEXTURIZADO A LASER E REVESTIDO DE TiAIN**

Rhander Viana  
Milton Sérgio Fernandes de Lima  
Paulo Vinícius da Silva Resende

**DOI 10.22533/at.ed.1732118069**

**CAPÍTULO 10..... 142**

**ESTUDO DO GRADIENTE DE TEMPERATURA DURANTE O FRESAMENTO DO AÇO AISI 4340 UTILIZANDO O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

Nicollas Vivaldini  
Rodrigo Henriques Lopes da Silva

**DOI 10.22533/at.ed.17321180610**

**CAPÍTULO 11 ..... 150**

**IDENTIFICAÇÃO DO MOMENTO IDEAL DE TROCA DE FERRAMENTAS DE CORTE ATRAVÉS DO MONITORAMENTO DO DESGASTE POR SINAL DE VIBRAÇÃO E**

## **INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL**

Lucas Costa Brito

Márcio Bacci da Silva

Marcus Antonio Viana Duarte

**DOI 10.22533/at.ed.17321180611**

## **CAPÍTULO 12..... 165**

### **METROLOGIA PARA ENGENHARIAS: CONSTRUÇÃO DE UM PROJETO METROLÓGICO PARA APLICAÇÃO DE CONCEITOS**

Lisiane Trevisan

Daniel Antonio Kapper Fabricio

**DOI 10.22533/at.ed.17321180612**

## **CAPÍTULO 13..... 175**

### **POTENCIAL ECONÔMICO E ENERGÉTICO DO APROVEITAMENTO DO CALOR REJEITADO POR CONDICIONADORES DE AR**

David Coverdale Rangel Velasco

José Alexandre Tostes Linhares Júnior

Felipe Perissé Duarte Lopes

Carlos Maurício Fontes Vieira

Afonso Rangel Garcez de Azevedo

**DOI 10.22533/at.ed.17321180613**

## **CAPÍTULO 14..... 184**

### **EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO REGIME DE TRABALHO DE REFRIGERADOR DE GRÃOS INTEGRADO A TUBOS CANADIANOS**

Eduarda Silva Costa

Matheus Júnio Souza da Silva

Ramiro de Matos Bertolina

Thiago Ferreira Gomes

**DOI 10.22533/at.ed.17321180614**

## **CAPÍTULO 15..... 193**

### **DIMENSIONAMENTO DE CARGA TÉRMICA DE CONDICIONARES DE AR NO BRASIL: UM ESTUDO DE CASO COMPARATIVO ENTRE A NR 17 E NBR 16401**

David Coverdale Rangel Velasco

José Alexandre Tostes Linhares Júnior

Márcio Paulo Bonifácio das Neves

André Luiz Vicente de Carvalho

Afonso Rangel Garcez de Azevedo

**DOI 10.22533/at.ed.17321180615**

## **CAPÍTULO 16..... 205**

### **AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO NO INTERIOR DE UM VEÍCULO AUTOMOTOR PERTENCENTE À FROTA DE TRANSPORTE PÚBLICO COLETIVO NO MUNICÍPIO DE CUIABÁ-MT**

Roberta Daniela de Souza

Marcelo Dias de Souza

Jonathan Willian Zangeski Novais

**DOI 10.22533/at.ed.17321180616**

**CAPÍTULO 17..... 211**

**AVALIAÇÃO ERGONÔMICA DE UM VEÍCULO BAJA**

Arthur Barroso Costa

João Lucas Moura Ferreira

Igor Antunes Ferreira

Luiz Gustavo Monteiro Guimarães

**DOI 10.22533/at.ed.17321180617**

**CAPÍTULO 18..... 234**

**UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DO USO DA AUTOMAÇÃO NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO BRASIL**

Igor Moreno Mamedes

Andrea Teresa Riccio Barbosa

**DOI 10.22533/at.ed.17321180618**

**CAPÍTULO 19..... 245**

**PRINCIPAIS PARÂMETROS DE DESEMPENHO EMPREGADOS PELAS EMBARCAÇÕES DE PEQUENO PORTE MOVIDAS A ENERGIA FOTOVOLTAICA NO DESAFIO SOLAR BRASIL**

David Coverdale Rangel Velasco

Valter Luís Fernandes de Sales

**DOI 10.22533/at.ed.17321180619**

**CAPÍTULO 20..... 255**

**VIABILIDADE ECONÔMICA DA ENERGIA FOTOVOLTAICA RESIDENCIAL**

David Coverdale Rangel Velasco

Elivandro Tavares Lôbo

Welder Azevedo Santos

Wagner Vianna Bretas

Rodrigo Martins Fernandes

**DOI 10.22533/at.ed.17321180620**

**CAPÍTULO 21..... 268**

**SINTONIA DE CONTROLADORES DE TEMPERATURA COM REDES NEURAIS**

Tiago Luís Andrade Pereira

Anderson Daleffe

**DOI 10.22533/at.ed.17321180621**

**CAPÍTULO 22..... 284**

**COMPARISON OF STRAIN AND LOAD OBTAINED VIA STRAIN GAGE BY WIRE AND WIRELESS TRANSMISSIONS**

Raphael Basilio Pires Nonato

Luiz Carlos Gomes Sacramento Júnior

Leonardo Ferreira Ribeiro

**DOI 10.22533/at.ed.17321180622**

**CAPÍTULO 23.....300**

SISTEMA AUTOMATIZADO DESTINADO À ALIMENTAÇÃO DE ANIMAIS DE PEQUENO PORTE

Eliezer Silva Bonfim de Jesus

Guilherme de Souza Carneiro Meireles

Josedacson Barbosa de Lacerda

Kevin Ruan dos Reis Oliveira

Rúi Carlos de Sousa Mota

**DOI 10.22533/at.ed.17321180623**

**SOBRE OS ORGANIZADORES .....307**

**ÍNDICE REMISSIVO.....308**

# CAPÍTULO 1

## ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA DE UTILIZAÇÃO DA FIBRA DE BANANEIRA COM RESINA SINTÉTICA EM COMPÓSITOS

Data de aceite: 01/06/2021

Data de submissão: 03/04/2021

**Rui Carlos de Sousa Mota**

Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia da Bahia (IFBA)  
Simões Filho – BA  
<http://lattes.cnpq.br/8101200419429469>

**José Ubiragi de Lima Mendes**

Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
(UFRN)  
Natal - RN  
<http://lattes.cnpq.br/7103009428184656>

**RESUMO:** Este trabalho objetiva apresentar os estudos das propriedades mecânicas de um compósito de resina poliéster e fibra de bananeira (*Musa s.p.*, Musáceae), como substituição à fibra de vidro, a ser utilizado em elementos estruturais que não demandem grandes esforços mecânicos. Para a análise, foram retiradas as talas do pseudocaule, sendo feita a fibrilização de forma manual, com o auxílio de uma escova de aço, seguido de secagem ao natural. Após tratamento para limpeza e retirada de cera, cortaram-se pedaços de aproximadamente 60mm a 100mm para, juntamente com a resina sintética, fabricar placas de um compósitos de características fibrosa de orientação aleatória, em relação ao peso da resina. Foram utilizadas três porcentagens distintas de fibras (3,6% e 9%), para fazer um estudo comparativo entre eles e em relação a um corpo sem fibra da

mesma resina. Fabricaram-se corpos de prova de cada material, os quais foram submetidos aos ensaios de tração uniaxial, flexão em três pontos, absorção de umidade e características térmicas. A análise dos resultados demonstra ocorrer acréscimo de peso e, em determinada proporção, obtêm-se incremento na flexibilidade e aumento da resistência à fratura, configurando-se como um material de aplicação viável, desde que não sejam necessários grandes esforços mecânicos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fibra vegetal, Fibra natural, Fibra de bananeira, Compósito híbrido.

### TECHNICAL FEASIBILITY ANALYSIS OF USE OF FIBER BANANA TREE WITH SYNTHETIC RESIN IN COMPOSITES

**ABSTRACT:** This paper aims to present the studies of mechanical properties of a composite polyester resin and fiber of banana tree (*Musa sp.*, Musac) as a replacement to fiberglass, to be used in structural elements that do not demand large mechanical stress. For the analysis, the splints were removed from the pseudostem, and the fibrilization done manually, with the aid of a wire brush, followed by natural drying. After treatment for cleaning and removal of wax, were cut pieces of approximately 60mm to 100mm for, in combination with synthetic resin, making cards of a composite in features fiber with random orientation in relation to the weight of the resin. Were used three different percentages of fiber (3.6% and 9%), to make a comparative study between them and in relation to a sample without fiber of the same resin. Were made samples of each material, which were submitted to uniaxial

tensile tests, three point bending, moisture absorption and thermal characteristics. The results analysis shows occurrence of weight increasing, and to some extent, it's obtained increased flexibility and improved resistance to fracture, configured as a material to be feasible, provided they do not require major mechanical stress.

**KEYWORDS:** Plant fiber, Natural fiber, Banana tree fiber, Hybrid composite.

## 1 | INTRODUÇÃO

Atualmente, com a preocupação crescente com o meio ambiente e a inevitável redução de custos para otimizar a produção e tornar o produto final mais acessível, torna-se imprescindível a utilização de matérias-primas alternativas e com boa aceitação no mercado; neste contexto, novos materiais compósitos a base de resina polimérica e fibras vegetais surgem a cada dia (AGOPYAN; SAVASTANO JÚNIOR, 1997). Tudo isso leva em consideração as propriedades e características desses materiais (alongamento, peso específico, resistência mecânica, estabilidade térmica etc.), pois são determinantes na definição de aplicabilidade, estando diretamente ligadas à matriz, que é a resina, e ao reforço, que é a fibra, sendo que a empregabilidade e aderência destes poderão criar uma interface na qual as propriedades individuais praticamente desaparecem, dando lugar às propriedades que vão caracterizar o compósito (LEÃO, 2008).

A aplicação estrutural principalmente em peças de pouca solicitação mecânica vem crescendo de forma singular, o que leva um crescente número de recentes pesquisadores a buscar novos materiais e a aperfeiçoar processos já existentes de obtenção de fibras e modos de fabricação e estruturas das mais diversas. No Brasil, das fibras com maior aceitação no mercado estão as de algodão, linho, sisal (MENDES, 1992), juta (MONTEIRO et al., 2006), rami, licuri (LEÃO, 2008), bananeira (BALZER et al., 2007) e outras.

Neste contexto, o presente estudo objetiva apresentar a viabilidade da utilização de uma fibra vegetal (bananeira – musácea) Figura (1) em um compósito com resina sintética ortoftálica. A escolha desta fibra se dá pela facilidade de obtenção das mesmas, já que todos os anos várias toneladas do pseudocaule são descartadas após a colheita dos frutos, pois seu aproveitamento é quase nulo ou, mesmo quando utilizado de forma artesanal, não é valorizado ou agrega em si um valor irrisório para o produtor. Logo, este trabalho está abalizado na fabricação de um material em que serão utilizadas fibras secas de bananeira, resina sintética ortoftálica, com as quais foram confeccionados corpos de prova, sendo estes submetidos a ensaios e testes laboratoriais de acordo com as normas, e posteriores testes para comprovações técnicas dos resultados obtidos.





Figura 1 – Bananeira e suas fibras.

Fonte: Os Autores

## 2 | METODOLOGIA APLICADA

As lâminas foram retiradas do pseudocaule da bananeira “in natura”, de forma manual, a aproximadamente quinze centímetros do solo e com um comprimento de um metro; após isso, o pseudocaule foi seccionado em pedaços de 300 mm, sendo que o mesmo possui em média 30 cm de diâmetro, e uma bananeira possui em média de três a cinco metros de altura. As placas foram retiradas com auxílio de um estilete e desfiadas utilizando-se uma escova de aço em um processo manual; depois, foram colocadas para secar ao ar livre por um período de aproximadamente 3 a 4 dias e, após secas, foram cortadas com uma tesoura em um tamanho padrão (30 mm a 120 mm). Aplicou-se uma resina préacelerada do tipo AZ-46 padrão, produzida pela empresa AraAshland, e foram utilizados um molde de granito e cera desmoldante de carnaúba, tendo o processo sido realizado através de laminação manual (Hand-Lay-Up).

Foram confeccionadas três placas do compósito com as porcentagens de fibras especificadas e dez corpos de prova (cinco grandes e cinco pequenos) na seguinte configuração: 1ª placa com 3% em volume de fibras, 2ª placa com 6% e por último a 3ª placa com 9%. O diâmetro médio da fibra de bananeira foi de 0,10mm e obtido de forma aleatória com 15 (quinze) fibras e nelas foram feitas três medidas com um micrômetro de resolução 0,01 mm, marca Mitutoyo, em uma sala climatizada a aproximadamente 22°C. A decisão de serem tomadas três medidas foi em virtude da nãoconformidade das fibras, e vale salientar que as mesmas foram tratadas e secas ao ar livre.

### 2.1 Preparação das placas para a fabricação dos corpos de prova

Primeiramente, foram pesadas em uma balança eletrônica, Quimis-200, as quantidades de fibras para cada placa a ser confeccionada respectivamente para 3%, 6%,

9% em relação a massa da resina. Em seguida, as fibras foram colocadas no molde de mármore, sendo então efetuada uma umidificação com água destilada com spray para melhorar a moldagem e, depois, colocando-se em uma prensa hidráulica com uma placa de madeira para dar uma melhor compressibilidade, formando uma manta. Esta operação durou aproximadamente uma semana para cada placa, entre a moldagem e secagem.

Após a retirada, as placas foram colocadas em um molde de granito com dimensões de 400 mm X 250 mm X 7 mm, devidamente preparado para a impregnação pelo método de fabricação Hand Lay Up com a resina poliéster ortoftálica do tipo Arazen – 4.1 PA (fornecida pela Bahia Química S.A.), que foi catalisada com 10% do volume total da resina, ou seja, 10 ml para cada 100 ml de resina utilizada, levando um tempo de aproximadamente 40 minutos pra gelificar (atingir o ponto de gel) e mais duas horas para atingir a cura total.

Em seguida, a placa foi colocada em uma estufa artesanal para efetuar a pós-cura por mais quatro horas. Percebeu-se que a impregnabilidade ou a facilidade de molhação (molhabilidade) da fibra com a resina é difícil, além de sua absorção ser grande, sendo necessária uma grande atenção para não haver fibras descobertas, mascarando assim os resultados obtidos.

Depois de desmoldadas, as placas foram levadas para serem cortadas na Acriplanos, empresa localizadas em Salvador-BA, em uma fresadora do tipo Router T-30.

Foi utilizada uma freza de 3 mm para efetuar os cortes de acordo com as especificações da American Society for Testing and Materials (ASTM, 1990), ou seja:

- Tração uniaxial – 203 mm x 25 mm x 6 mm
- Flexão em três pontos – 125 mm x 10 mm x 6 mm

Todos os corpos de prova ficaram com um sobrematerial de aproximadamente 1 mm para posterior lixamento e polimento. Para isso, preparou-se uma bancada metalográfica Figura (2) e (3), na qual foi feito o lixamento dos corpos de prova de maneira manual com as lixas d'água de números 220, 320, 400, 600, e 1200, por um período de aproximadamente 60 minutos entre lixamento e polimento (tempo esse baseado na analogia com a preparação de corpos de prova para metalurgia), a fim de se atingirem as dimensões desejadas.



Figura 2 – Lixamento.

Fonte: Os Autores



Figura 3 – Polimento.

Fonte: Os Autores

### 2.1.1 Laminação Manual (*Hand Lay Up*)

Nesse método, Figura (4) a superfície é devidamente preparada, sendo então utilizado um molde com cera desmoldante e álcool desmoldante, no qual feltros de fibras enrolados, mechas trançadas, mantas ou outros tecidos de fibras são colocados. Impregna-se o molde com resina devidamente preparada, utilizando-se um pincel, e, para melhorar o processo de impregnação, são usados rolos de alumínio com o objetivo de eliminar bolhas. O processo continua com a colocação das camadas até a obtenção da espessura (ou configuração) desejada para a peça. O moldado é curado sem calor nem pressão.

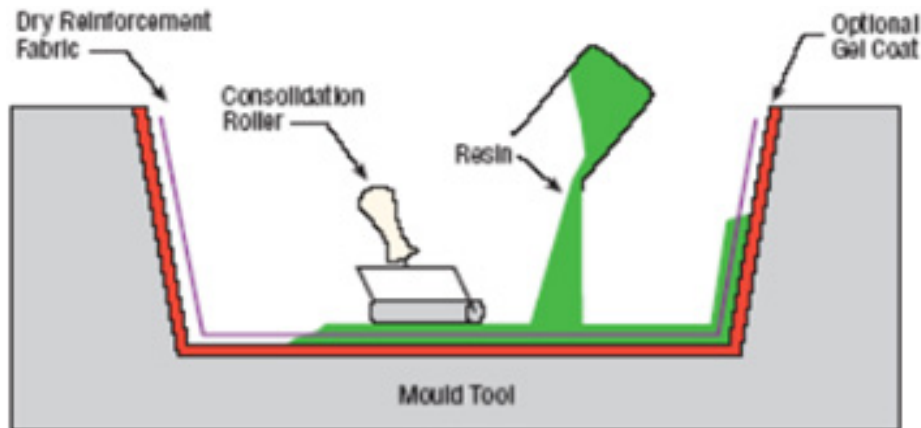


Figura 4 – Hand Lay Up.

Fonte: Saint Gobain Vertrotex, 2008

### 2.1.2 Testes

Foram realizados testes de tração uniaxial para definir o módulo de elasticidade e módulo de ruptura, absorção de umidade e flexão em três pontos, para definir a tensão de ruptura, a resistência última e a caracterização térmica, no intuito de melhor especificar a aplicabilidade deste compósito de forma comercial.

## 2.2 Ensaio de tração uniaxial

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina de ensaios mecânicos SHIMADZU, modelo AG-1, com capacidade máxima de 250 KN, na qual se utilizou uma placa de aquisição de dados para obtenção dos valores de deslocamento e carga aplicada no material. Cuidados especiais foram tomados antes da realização dos ensaios, como, por exemplo, ajustes prévios dos corpos de prova nas “garras” da máquina, de forma a amenizar problemas de “arrastes” no início do carregamento; desta forma, consegue-se um melhor controle sobre os dados relacionados ao deslocamento. Com isso, foi possível se obter o limite de resistência, o módulo de elasticidade longitudinal (na direção de aplicação da carga) e a deformação de ruptura dos compósitos. Por último, efetuou-se o cálculo de um valor médio para cada parâmetro estudado. As dimensões dos corpos de prova seguiram a norma ASTM D3039 (2000). O valor da velocidade de deslocamento dos ensaios foi de 1 mm/min., e os ensaios foram feitos à temperatura de 22°C, com uma umidade relativa do ar de 56%.

## 2.3 Ensaio de termogravimetria

Este é um ensaio que permite medir a perda de massa de uma determinada substância ou material em função do aquecimento controlado e do tempo, caracterizando

assim o comportamento térmico dos materiais. A metodologia básica da termogravimetria consiste em uma balança eletrônica de precisão acoplada a um forno que tenha o aumento controlado da temperatura de forma linear com o tempo. Nesta pesquisa, a amostra foi analisada em um analisador termogravimétrico, TGA- 51 H, marca SHIMADZU (Figuras 45 e 46), em uma atmosfera de ar normal, pois reflete o ambiente em que o compósito será utilizado, um cadinho de platina, com um gradiente de temperatura de 28°C a 500°C, a uma taxa de aquecimento de 10°C por minuto. A amostra em forma de raspa foi colocada em um cadinho devidamente tarado acoplado a uma plataforma; dentro dele foram colocados 5 mg de cada amostra por vez, para serem determinadas as temperaturas de degradação para cada concentração do compósito. O cadinho foi então envolvido pelo forno elétrico, de maneira tal que a amostra pudesse ter sua temperatura monitorada em função da variação da potência do forno.

Os resultados são apresentados em forma de curvas termogravimétricas (TG), em que a variação do peso é constatada em relação ao aumento controlado da temperatura ou do tempo. Assim sendo, qualquer mudança na massa que venha a ocorrer em temperaturas próximas logo será identificada. Alguns fatores que podem afetar o resultado de um ensaio termogravimétrico são: efeitos instrumentais (velocidade do forno, atmosfera, forma e material do cadinho), características da amostra (peso, granulometria, umidade, forma de preparação), entre outros.

Parâmetros:

- a) Detector – TGA – 51 H
- b) Celula – Platinum
- c) Atmosfera – Ar
- d) Taxa – 50.00ml/min.
- e) Taxa temperatura – 10°C/min.
- f) Faixa de ensaio – 0° ate 500°C
- g) Peso – 5,0mg

## 2.4 Ensaio de absorção de umidade

Para o ensaio de absorção de umidade foram confeccionados trinta corpos de prova, sendo cinco grandes e cinco pequenos para cada percentagem de fibra. Foi feita uma microscopia óptica nos CPs, (laboratório da Gerdau) para identificar possíveis defeitos de fabricação como bolhas e vazios etc.

Os corpos de prova foram pesados e colocados em um recipiente plástico contendo água destilada, sendo este devidamente tampado, para a observação da absorção de umidade por parte do compósito em decorrência do tempo de imersão até a sua saturação, de acordo com a norma ASTM D 570-95 (ASTM, 1995). Todo esse processo é lento, levando aproximadamente 120 dias, e o acompanhamento se deu a princípio com a pesagem de duas em duas horas, sendo aumentado este tempo gradativamente. Para

realizar as pesagens, cada um dos corpos de prova foi retirado com o auxílio de uma pinça metálica, evitando-se assim o contato com as mãos e, conseqüentemente, não transferindo massa para os mesmos pela oleosidade da pele; após isso, foram secados com papel absorvente e pesados em uma balança de cinco dígitos da marca Quimis – Q 500L210C, com capacidade máxima de 210g, a qual foi devidamente tarada, sendo os dados lançados em uma tabela para posterior plotagem. Até então, a absorção ainda não tinha sido total, porém, aos oitenta dias de imersão, pôde ser vista uma tendência a saturação. Este ensaio foi totalmente realizado no laboratório de microscopia do IFBA – SF.

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

A expectativa maior deste projeto é possibilitar o desenvolvimento ou a criação de subsídios para que alguma empresa (seja privada ou governamental) desenvolva um compósito de baixo custo, que possa ser utilizado tanto na construção civil como no agronegócio e também na indústria metal mecânico. Busca-se reduzir-se, assim, o gasto com outros componentes que não são biodegradáveis, vindo a contribuir desta maneira para um mundo mais limpo e ambientalmente equilibrado.

São apresentados, a seguir, os resultados obtidos nos ensaios realizados com o compósito estudado e suas pertinentes discussões.

#### 3.1 Resultados dos ensaios de flexão em três pontos

As Tabelas (1) e (2) apresentam os resultados dos ensaios de flexão em três pontos para as três concentrações de fibra estudadas, secas e úmidas saturadas e os gráficos das Fig. (5) e (6) o comportamento assumido pela deflexão e módulo de elasticidade.

PROPRIEDADES	3%	6%	9%
Tensão de flexão (MPa)	36,8	44,0	31,8
Módulo de elasticidade (GPa)	2,5	2,3	2,1

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do compósito seco.

Fonte: Os Autores

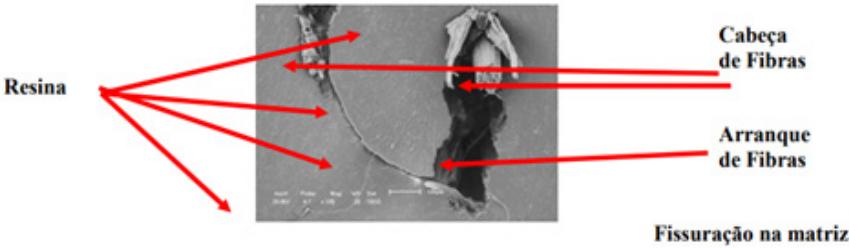


Figura 5 – Microscopia eletrônica de varredura.

Fonte: Laboratório CTGás

Observou-se que a concentração de fibra com maior tensão de flexão para as amostras secas foi a de 6% e a menor de 9%. Em relação a esse parâmetro a de maior tensão foi 27,7% superior a de menor tensão.

Em relação ao módulo de elasticidade na flexão a concentração com melhor resultado foi a de 9%, com variação máxima para as três concentrações em torno de 20%.

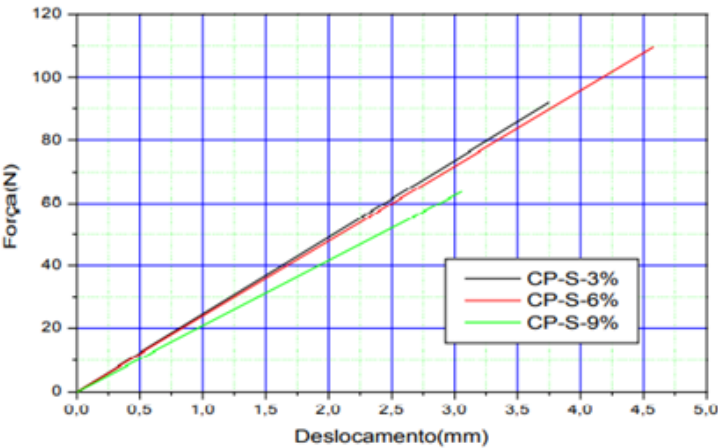


Figura 6 – Comportamento médio assumido pelos valores de deflexão.

Fonte: Os Autores

PROPRIEDADES	3%	6%	9%
Tensão de flexão (MPa)	31,0	34,4	29,0
Módulo de elasticidade (GPa)	2,0	2,0	0,14

Tabela 2 – Propriedades mecânicas do compósito úmido saturado.

Fonte: Os Autores

Observou-se que a concentração de fibra com maior tensão de flexão para o as amostras úmidas foi a de 6% e a menor de 9%, obtendo-se o mesmo comportamento em relação a amostra seca Em relação a esse parâmetro a de maior tensão foi 18,6% superior a de menor tensão. Em relação ao módulo de elasticidade na flexão a concentração com melhor resultado foi a de 9%, sendo muito superior em relação as outras duas concentrações estudadas (Figura 7).



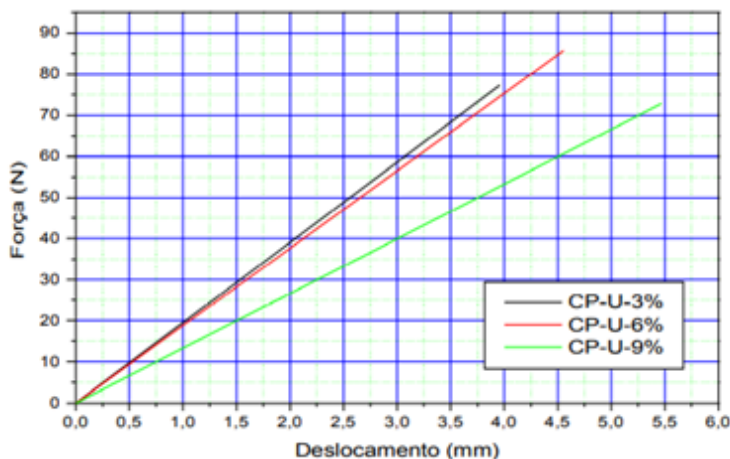


Figura 7 – CP Seco: Força x Deflexão.

Fonte: Os Autores

As Tabelas (3) e (4) apresentam os resultados dos ensaios de tração uniaxial para as três concentrações de fibras estudadas, secas e úmidas saturadas e os gráficos das Fig. (8) e (9) mostram o comportamento assumido pela resistência última e módulo de elasticidade.

PROPRIEDADES	3%	6%	9%
Resistência Última (MPa)	9,2	8,4	9,3
Módulo de elasticidade(GPa)	1,0	1,5	1,2

Tabela 3 – Propriedades mecânicas do compósito seco.

Fonte: Os Autores

Observou-se que a concentração de fibra com maior resistência a tração para as amostras secas foi a de 9% e a menor de 6%. Em relação a esse parâmetro, a de maior resistência foi 10,7% superior à de menor resistência. Em relação ao módulo de elasticidade na tração, a concentração com melhor resultado foi a de 3%, sendo que não foi muito superior em relação às outras duas concentrações estudadas.

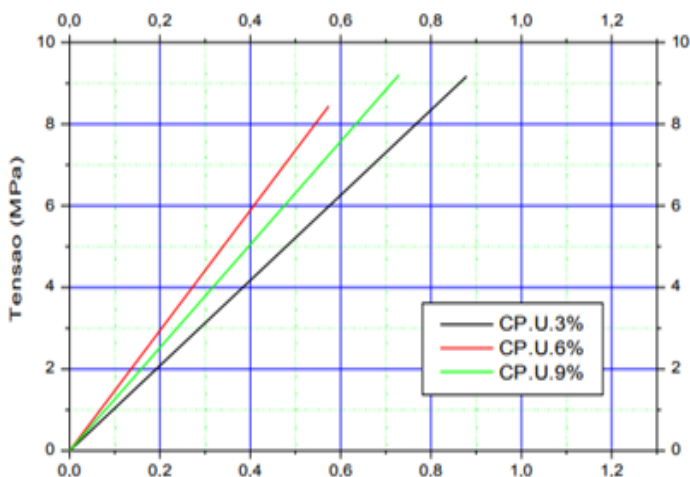


Figura 8 – Deformação x Tensão (Valores médios).

Fonte: Os Autores

PROPRIEDADES	3%	6%	9%
Resistência Última (MPa)	9,8	9,8	11,2
Módulo de elasticidade (GPa)	0,7	0,7	0,8

Tabela 4 – Propriedades mecânicas do compósito úmido saturado.

Fonte: Os Autores

Observou-se que a concentração de fibra com maior resistência a tração para as amostras úmida saturada foi a de 9% ficando as outras com comportamento equivalente. Em relação a esse parâmetro a de maior resistência foi 14,3% superior a de menor resistência.

Em relação ao módulo de elasticidade na tração a concentração com melhor resultado foram as de 3% a de 6%, sendo que não foi muito superior em relação a outra concentração estudada.

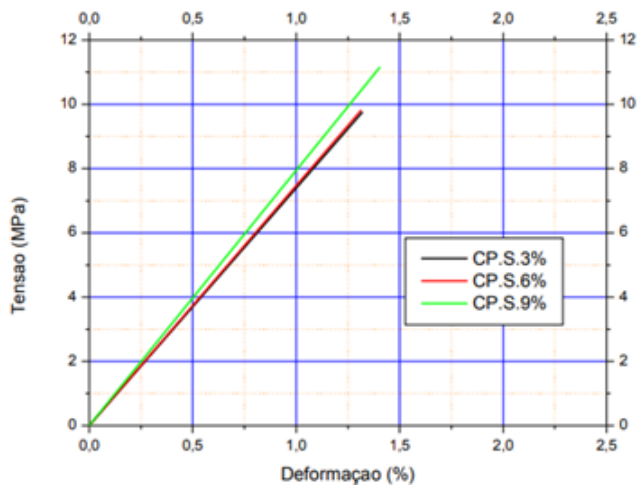


Figura 9 – Deformação x Tensão (Valores médios).

Fonte: Os Autores

### 3.2 Gráficos de resultados da absorção de umidade

Os gráficos das Fig. (10), (11) e (12) apresentam o comportamento assumido pela massa das amostras, pequenas e grandes, no teste de absorção de umidade para oitenta dias.

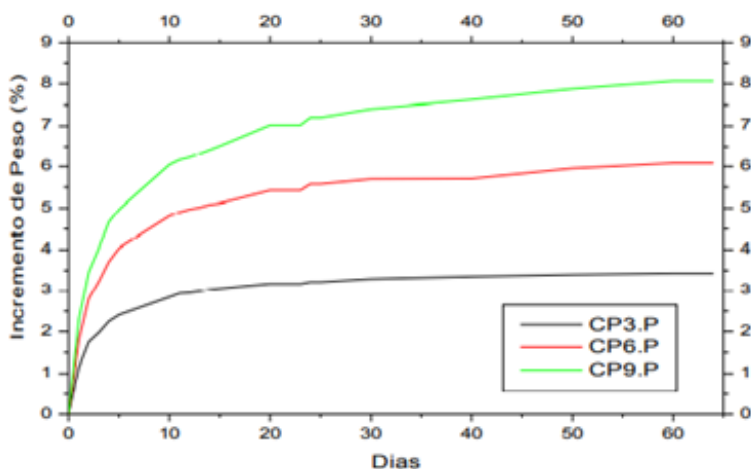


Figura 10 – Dias x Incremento de Peso (%).

Fonte: Os Autores

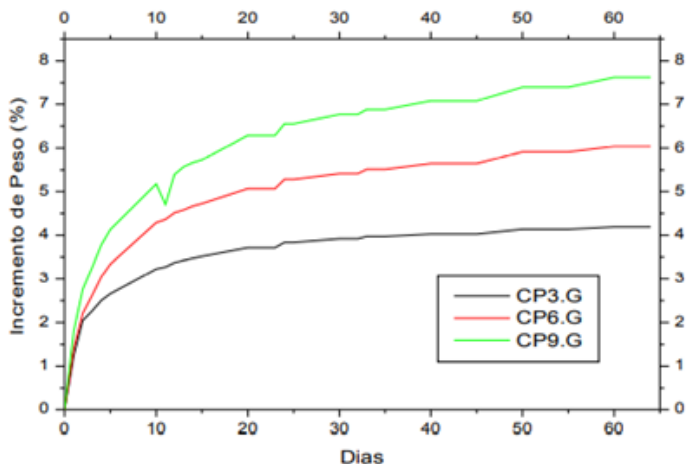


Figura 11 – Dias x Incremento de Massa (%).

Fonte: Os Autores

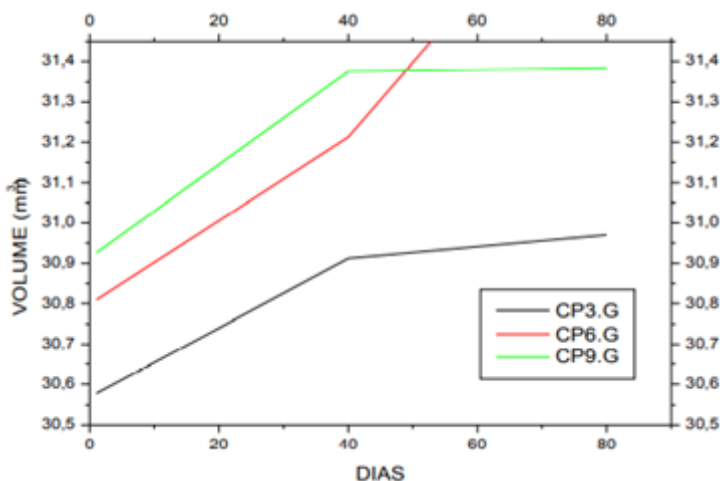


Figura 12 – Dias x Volume.

Fonte: Os Autores

Percebe-se que este compósito pode ter uma boa aceitação, pois apresenta rápida saturação indicando que o material pode ser utilizado em locais de alta umidade, como reservatórios, calhas etc. Observou-se, também, que não ocorreram grandes deformações volumétricas e de massa.

Após os oitenta dias de realização dos ensaios, com os CPs retirados da água, efetuou-se medições e constatou-se que não ocorreram alterações significativas, o que demonstra que pode ser aplicação onde se exija um controle dimensional mais rígido.

### 3.3 Gráficos termogravimétricos

Os gráficos das Fig. (13), (14) e (15) apresentam o comportamento assumido pelas amostras nos ensaios termogravimétricos para as três concentrações de fibras estudadas.

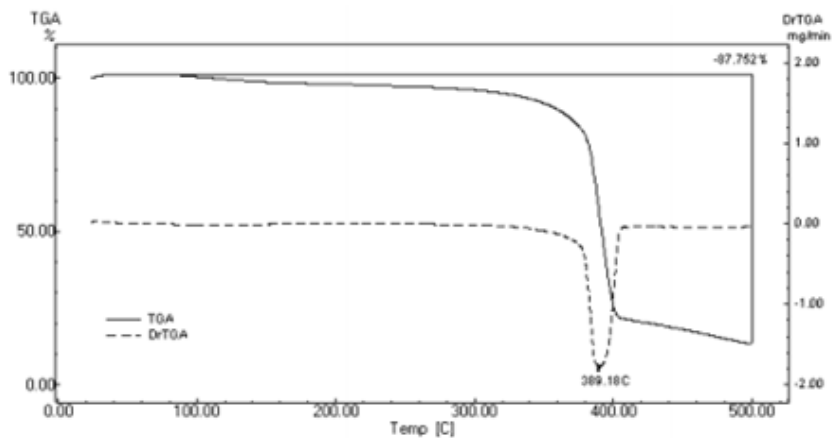


Figura 13 - Termogravimétrico CP 3%.

Fonte: Os Autores

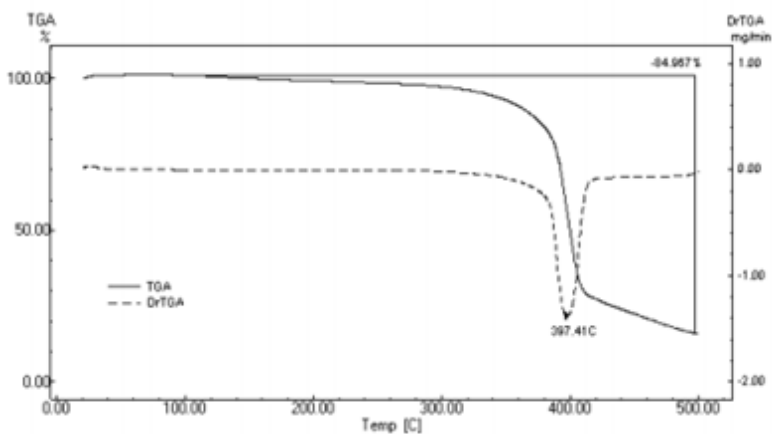


Figura 14 - Termogravimétrico CP 9%.

Fonte: Os Autores

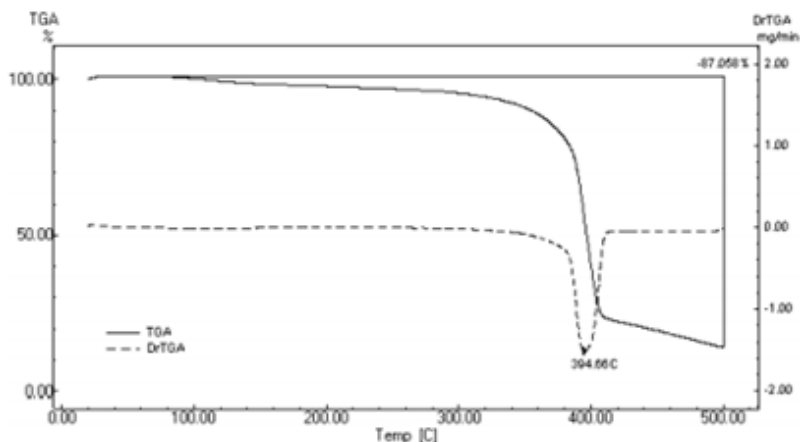


Figura 15 - Termogravimétrico CP 6%.

Fonte: Os Autores

Observou-se que o compósito começou a perder massa a partir de 90°C para as concentrações de 3% e 6%, enquanto para a concentração de 9% esta temperatura elevou-se para 120°C.

A partir deste ponto aconteceu um decréscimo lento, porém contínuo da massa até a perda de aproximadamente 85% do total a uma temperatura média de 380°C.

Isso demonstrou que este material pode trabalhar numa faixa de temperatura de 85°C sem comprometer a segurança e nem suas propriedades.

## 4 | CONCLUSÕES

Apresentam-se, a seguir as conclusões oriundas da análise dos resultados encontrados nesta pesquisa.

- A fibra da bananeira possui uma microestrutura semelhante às demais fibras vegetais.
- Em sua composição microestrutural, pode-se dar destaque ao alto percentual das microfibrilas de celulose, conduzindo a bons resultados nas propriedades mecânicas.
- Os percentuais de fibras escolhidos foram determinantes nos resultados dos ensaios;
- O módulo de tração da fibra é relativamente baixo, porém possui um alongamento superior às demais fibras que hoje são utilizadas.

- O compósito possui boa estabilidade térmica, o que possibilita sua aplicação em temperaturas até 100°C.
- A fibra possui bom alongamento.
- Não foram registradas grandes alterações nos resultados dos ensaios de tração e flexão entre os CPs seco e úmido.
- Devido à boa impregnação da fibra, ocorreu uma saturação à umidade com um baixo tempo de imersão.
- O processo de fabricação (*Hand Lay Up*) influenciou diretamente nos resultados, o que foi comprovado pela característica da fratura mecânica no compósito, ou seja, fratura frágil.
- De forma geral, o uso de fibra de bananeira é viável, bastando uma melhoria no processo de obtenção das fibras (mecanização do procedimento) e um maior cuidado na fabricação das peças.
- Caso haja um melhoramento no método de obtenção de fibras (mecanização), ocorrerá a agregação de maior valor ao produto final.
- Este compósito pode ser um diferencial na vida de comunidades carentes e pequenos produtores de banana, pois, devido ao seu baixo custo de fabricação, possui um grande potencial de ser implementado por cooperativas de trabalhadores rurais.
- O compósito com concentração de 9% de fibra teve um desempenho superior aos demais, no comportamento térmico, embora todos tenham obtido resultados satisfatórios.
- Nos demais ensaios o compósito com 3% de fibras obteve melhores resultados.

## REFERÊNCIAS

AGOPYAN, V.; SAVASTANO JÚNIOR, H. Uso de materiais à base de fibras vegetais na construção civil: experiência brasileira. In: SEMINÁRIO IBEROAMERICANO DE MATERIAIS FIBROREFORZADOS, Y reunion del proyecto PIP VIII. 5 cyted, Cali, 1997. **Memórias**. Cali: Cytel/ Universidad del Valle, p. 23-40.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3039**. Standard Test Methods for tensile Properties of Polymer Matrix composites. Philadelphia: ASTM, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D570**. Standard Test Methods for Water Absorption of Plastics. Philadelphia: ASTM, 1995.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D790**. Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. Philadelphia: ASTM, 1990.



BALZER, P. et al. Estudo das Propriedades Mecânicas de um Composto de PVC Modificado com Fibras de Bananeiras. **Polímeros**, São Carlos, 2007. v. 17, n. 1, jan/mar. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-14282007000100004](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282007000100004). Acesso em: 02 abr. 2021.

LEÃO, M.A. **Fibras de licuri**: um reforço alternativo de compósitos poliméricos. 2008 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. Orientadores: Prof<sup>a</sup>. Dra. Eve Maria Freire de Aquino; Prof. Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire Júnior.

MENDES, T.M.F.F. **Propriedades de Resistência à Tração e ao Impacto de Compósitos Poliéster Sisal**: Um estudo Comparativo. 1992, 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), UFRN, Natal.

MONTEIRO, S.; TERRONES, L. A. H.; CAMERINI, A. L. Propriedades de compósitos de tecido de juta descartado reforçando matriz de polietileno reciclado. **Matéria**. (Rio J.), 2006, vol. 11, n.º 4, pp. 403 – 411. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1517-70762006000400006&script=sci\\_abstract&tlng=pt](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1517-70762006000400006&script=sci_abstract&tlng=pt). Acesso em 25 mar 2021.

SAINT GOBAIN VETROTEX. **Processos**. 2008. Disponível em: [https://www.researchgate.net/figure/Figura-3-Processo-de-moldagem-por-contato-manual-hand-lay-up-Fonte-Saint-Gobain\\_fig2\\_346572342](https://www.researchgate.net/figure/Figura-3-Processo-de-moldagem-por-contato-manual-hand-lay-up-Fonte-Saint-Gobain_fig2_346572342). Acesso em: 01 abr. 2021.

# CAPÍTULO 2

## CARACTERIZAÇÃO DA BORRA DE PIAÇAVA (*ATTALEA FUNIFERA*) PARA PRODUÇÃO DE BRIQUETES

Data de aceite: 01/06/2021

Data de submissão: 26/02/2021

**Mirtânia Antunes Leão**

Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia da Bahia

Salvador – Bahia

<https://orcid.org/0000-0002-4431-4816>

**Alexandre Silva de Moraes**

Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia da Bahia

Salvador – Bahia

<https://orcid.org/0000-0002-2420-6631>

**Vitor da Silva Lacerda**

Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia da Bahia

Salvador – Bahia

<https://orcid.org/0000-0001-8482-5680>

**Alberto Matheus Freitas Oliveira**

Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia da Bahia

Salvador – Bahia

<https://orcid.org/0000-0003-3593-6231>

**Ana Claudia Rangel da Conceição**

Universidade Federal da Bahia

Salvador – Bahia

<https://orcid.org/0000-0001-9351-2491>

**Carlos Alberto França Junior**

Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia da Bahia

Salvador – Bahia

<http://lattes.cnpq.br/6290668163271793>

**Victor Antunes Silva Barbosa**

Universidade Federal da Bahia

Salvador – Bahia

<https://orcid.org/0000-0001-5191-448>

**RESUMO:** Com a demanda e custos cada vez maiores dos combustíveis fósseis, tem-se buscado fontes alternativas de energia, resultando em menores emissões de gases nocivos à saúde humana e ao meio ambiente. A biomassa é uma opção promissora. Em sua forma compactada, pode-se melhorar seu manuseio, estocagem e eficiência energética. Neste sentido, o presente trabalho teve como objetivo caracterizar a borra de piaçava e avaliar as propriedades físicas e mecânicas dos briquetes produzidos com a borra da piaçava. A borra da piaçava foi caracterizada mediante análise química imediata e determinação do poder calorífico superior (PCS). Foram produzidos briquetes com três configurações granulométricas: B1 (0,841 a 0,297 mm), B2 (0,297 a 0,149 mm) e B3 (0,841 a 0,149 mm). A briquetagem foi realizada em uma prensa hidráulica, sem aquecimento e sem adição de aglutinante. Os briquetes foram avaliados por ensaios de expansão longitudinal, densidade aparente, tração por compressão diametral e friabilidade e os resultados obtidos foram discutidos de acordo com normas internacionais para briquetes. Os resultados demonstraram que as configurações B2 e B3 obtiveram estabilidade dimensional aceitável e ótimas condições para empilhamento devido ao bom desempenho mecânico. No entanto, todos

os briquetes foram classificadas como muito friáveis, sendo necessário estudos adicionais para otimizar a durabilidade dos briquetes.

**PALAVRAS-CHAVE:** Briquetes, piaçava, resíduo, biomassa, bioenergia.

## CHARACTERIZATION OF PIASSAVA LEES (*ATTALEA FUNIFERA*) FOR BRIQUETTE PRODUCTION

**ABSTRACT:** With the increasing demand and costs of fossil fuels, alternative energy sources have been sought, resulting in lower emissions of gases harmful to human health and the environment. In this sense, the present work aimed to characterize the piassava lees and to evaluate the physical and mechanical properties of the briquettes produced with the piassava lees. Briquettes were produced with three granulometric configurations: B1 (0.841 to 0.297 mm), B2 (0.297 to 0.149 mm) and B3 (0.841 to 0.149 mm). The briquetting process was carried out in a hydraulic press, without heating and without binder addition. The briquettes were evaluated by tests of longitudinal expansion, apparent density, tensile by diametrical compression and friability and the results obtained were discussed according to international standards for briquettes. The results showed that configurations B2 and B3 obtained acceptable dimensional stability and excellent conditions for stacking due to good mechanical performance. However, all briquettes were classified as very friable, requiring additional studies to optimize the durability of the briquettes.

**KEYWORDS:** Briquettes, piassava, residue, biomass, bioenergy.

## 1 | INTRODUÇÃO

O setor de energia desempenha um papel fundamental no desenvolvimento socioeconômico global, de modo que o consumo mundial energético cresce 2,3% ao ano (JAIGANESH *et al.*, 2014). Dessa maneira, buscam-se fontes alternativas de energia capazes de substituir os combustíveis fósseis, que estão associados a problemas ambientais (SRIVASTAVA *et al.*, 2014).

Os biocombustíveis são uma alternativa de fonte energética aos combustíveis fósseis pois sua utilização não contribui para o acúmulo de gases de efeito estufa, devido a fixação de carbono durante a fotossíntese de planta. Com isso, aumentou-se a demanda e volume de estudos de biomassas (VIRMOND *et al.*, 2012). Na Tabela 1, pode-se ver a análise química imediata de agro-resíduos e de outros materiais combustíveis.

Material	Tu (%)	tv (%)	TC (%)	CF (%)	PCS (MJ.kg <sup>-1</sup> )	Referência
Serragem	9,1	81,8	0,20	18,0	18,0	FELFLI <i>et al.</i> (2010)
Casca de arroz	11,4	65,9	17,0	17,1	14,0	FELFLI <i>et al.</i> (2010)
Bagaço de cana	53,4	77,3	8,7	14,0	16,0	ALMEIDA <i>et al.</i> (2017)
Carvão Colombiano	–	36,2	5,8	55,3	31,1	GÓMEZ <i>et al.</i> (2015)
Eucalipto	54,0	83,8	0,4	16,3	18,5	PIRRAGLIA <i>et al.</i> (2011)

Tabela 1 – Teores de umidade (TU), voláteis (TV), cinzas (TC), carbono fixo (CF) e poder calorífico superior (PCS) de alguns materiais combustíveis.

As propriedades da Tabela 1 são relevantes para a conversão termoquímica das biomassas. O alto teor de umidade traz problemas de ignição e combustão, afetando as propriedades físicas dos briquetes. O teor de voláteis determina a facilidade de ignição e queima. A relação carbono fixo/voláteis é relevante para a estabilidade da chama durante a combustão (VIRMOND *et al.*, 2012). As cinzas são negativas à combustão, pois produzem escória e incrustação, que causam perda de eficiência por resistência térmica, corrosão, geração de fumos e emissões de aerossóis (GARCÍA *et al.*, 2015).

No Brasil, cerca de 330 milhões de toneladas de resíduos de biomassa são gerados anualmente, porém, não são aproveitados como fonte de energia. Os agro-resíduos possuem baixa densidade e alto teor de umidade, resultando em elevados custos de transporte, manuseio e estocagem. Entretanto, a melhoria da eficiência da combustão dos agro-resíduos pode ocorrer através da densificação da biomassa por compactação, possibilitando um fornecimento maior de energia por unidade de volume (FELFLI *et al.*, 2010; KUHE *et al.*, 2013).

Este processo é conhecido como briquetagem, onde a biomassa em pequenas partículas é concentrada por equipamentos hidráulicos ou prensas mecânicas, em briquetes. Desta forma, pode-se reduzir o consumo e a dependência do carvão e da lenha, pois os briquetes são bons substitutos desses combustíveis para fins domésticos e industriais, auxiliando na redução de desmatamentos e do acúmulo de resíduos (PANWAR *et al.*, 2011).

As fibras da piaçava são utilizadas na produção de vassouras, isolantes térmicos e escovas. A borra da piaçava é um subproduto da extração das fibras geralmente utilizado como cobertura de quiosques. Além disso, cerca de 20% das fibras sejam eliminadas durante a produção, sendo incineradas. Neste sentido, a borra de piaçava pode ser considerada como matéria-prima para briquetes, pois, a palmeira *Attalea funifera* Mart., de onde é obtida a fibra, é uma espécie endêmica da Bahia (PAMPONET *et al.*, 2013).

A qualidade dos briquetes são afetadas pelo tamanho das partículas, umidade e pela lignina. A força de adesão entre as partículas do briquete tende a ser maior, quanto maior for o teor de lignina. A calor gerado durante a compactação eleva a temperatura do

material, devido ao atrito entre as próprias partículas e delas com a prensa, e quebra a lignina, melhorando a adesão entre as partículas (ALARU *et al.*, 2011). Na Tabela 2, nota-se que a piaçava possui elevado teor de lignina em comparação com fibras tradicionais.

Fibra	Lignina (%)	Celulose (%)	Hemicelulose (%)
Piaçava	48,4	31,6	–
Juta	13,0	61,0	20,4
Sisal	8,0	78,0	10,0
Coco	45,0	43,0	0,3

Tabela 2 – Composição química (% em peso) da piaçava e outras fibras vegetais.  
Fonte: D’ALMEIDA et al. (2006)

Portanto, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar a borra de piaçava visando seu uso em briquetes e avaliar a qualidade dos briquetes produzidos com diferentes configurações granulométricas. Com isso, visa-se o desenvolvimento de um biocombustível sustentável, avaliando-se mais uma alternativa de aplicação da borra de piaçava.

## 2 | MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

O material utilizado foi a borra de piaçava (Figura 1a) O material foi doado por uma fábrica de vassouras do município de Saubara/Bahia.

### 2.2 Preparação e caracterização do material

#### 2.2.1 Classificação granulométrica

Iniciou-se o processamento da biomassa com o corte da borra de piaçava (Figura 1b), para facilitar a moagem. Foi utilizado um moinho de facas tipo *Willey* (marca Marconi, modelo MA340) para a redução da granulometria, resultando no material da Figura 1c.

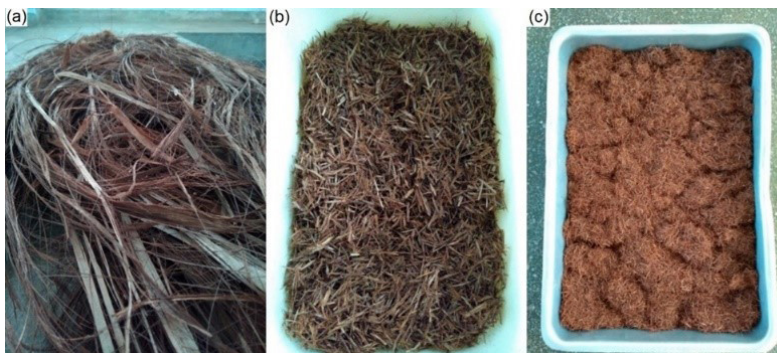


Figura 1 – Borra de piaçava (a) in natura, (b) cortada (a) e moída.

A classificação das partículas foi realizada pelo método de análise por peneiras, padronizada pela norma NBR NM 248/2003 (ABNT, 2003), utilizando um agitador eletromagnético para peneiras (marca Bertel, modelo BT-001) e um conjunto de peneiras de 20, 30, 40, 50, 80 e 100 Mesh com aberturas de malha de 0,841 mm; 0,595 mm; 0,420 mm; 0,297 mm; 0,177 mm e 0,149 mm, respectivamente. O ensaio foi realizado utilizando 100 gramas do material em um tempo de vibração de 3 minutos.

### 2.2.2 Teor de umidade, Análise química imediata e Densidade a granel

Para a determinação dos teores de voláteis, cinzas, carbono fixo, poder calorífico superior e da densidade a granel da borra de piaçava, conforme a norma E870-13 (ASTM, 2013), foi necessário corrigir o teor de umidade da biomassa para um teor entre 10 e 15%, ideal para produção de briquetes (KALIYAN E MOREY, 2008; TRIPATHI *et al.*, 1998). Para tanto, três amostras de 50 g cada foram secas a 100 °C em estufa (marca Marconi, modelo MA035/1) juntamente com a biomassa para a produção dos briquetes e pesadas a cada 2 horas até atingirem massa constante. O teor de umidade da biomassa (TU, em %) foi calculado pela Equação 1, onde  $MU_i$  é a massa da amostra antes da secagem (em g) e  $MU_f$  é a massa da amostra depois da secagem (em g).

$$TU = \frac{MU_i - MU_f}{MU_f} \times 100\% \quad (1)$$

Para a determinação do teor de voláteis, foram utilizadas três amostras de 1 grama colocadas em cadinhos de porcelana com tampa. As amostras foram levadas a um forno mufla (marca Brasimet, modelo EGH 20/30) a 900 °C durante 3 minutos com a porta aberta, e mais 7 minutos com a porta fechada. Em seguida, foram resfriadas em um dessecador e pesadas. O teor de voláteis (TV, em %) foi calculado conforme a Equação 3, onde  $MV_i$  é a massa da amostra antes da queima (em g) e  $MV_f$  é a massa da amostra após a queima (em g).

$$TV = \frac{MV_i - MV_f}{MV_f} \times 100\% \quad (3)$$

O teor de cinzas foi determinado para três amostras de 1 grama, colocadas em cadinhos sem tampa. As amostras passaram por uma pré-queima em um bico de *Bünsen* até levantar chama e colocadas no forno mufla a 600 °C por 4 horas. A seguir, o cadinho foi resfriado em um dessecador até a temperatura ambiente, depois pesados. O teor de cinzas (TC, em %) foi calculado conforme a Equação 4, onde  $MC_i$  é a massa da amostra antes da pré-queima (em g) e  $MC_f$  é a massa da amostra depois do forno mufla (em g).

$$TC = \frac{MC_i - MC_f}{MC_f} \times 100\% \quad (4)$$

O teor de carbono fixo (CF, em %) foi determinado a partir dos teores de voláteis (TV, em %) e cinzas (TC, em %), conforme a Equação 5.

$$CF = 100\% - (TV + TC) \quad (5)$$

A densidade a granel da biomassa ( $D_g$ , em g.cm<sup>-3</sup>) foi determinada em triplicata pela Equação 2, conforme a NBR 6922/81 (ABNT, 1981), onde,  $M_s$  é a massa da biomassa seca (em g) e  $V_r$  é o volume ocupado no béquer (em cm<sup>3</sup>).

$$D_g = M_s / V_r \quad (2)$$

### 2.2.3 Determinação do poder calorífico superior

Para a determinação do PCS, foi realizado o método de calorimetria diferencial de varredura (DSC), conforme adaptação de JOHANN *et al.* (2018). Para isso, utilizou-se um calorímetro diferencial de varredura (marca Shimadzu, modelo DSC-60). A análise foi realizada com cadinho de alumínio e com nitrogênio como gás de arraste, no intervalo de 30 °C a 160 °C, sob uma taxa de aquecimento de 10 °C/min e período isotérmico de 5 minutos. Para obtenção do calor específico da borra de piaçava foi utilizado o método da amplitude, conforme a Equação 6, onde  $cp_A$  é o calor específico da biomassa (em J/kg.K),  $m_s$  é a massa do material de referência (utilizado 2,00.10<sup>-6</sup> kg de safira sintética),  $m_A$  é a massa da amostra (utilizado 1,99.10<sup>-6</sup> kg de borra de piaçava),  $A_A$  é a amplitude entre a curva da linha base do DSC e a curva da amostra (mW),  $A_s$  é a amplitude entre a curva da linha base do DSC e a curva do material de referência (mW) e  $cp_s$  é calor específico do material de referência (em J/kg.K). Para a determinação das amplitudes das amostras e da safira,  $A_A$  e  $A_s$ , respectivamente, foi utilizado o *software* OriginPro 8.0.

$$cp_A = \frac{m_S}{m_A} \times \frac{A_A}{A_S} \times cp_S \quad (6)$$

## 2.3 Produção e ensaio dos briquetes

Para a avaliação da qualidade da briquetagem em diferentes granulometrias, foram definidas três configurações: B1 (0,841 a 0,297 mm), B2 (0,297 a 0,149 mm) e B3 (0,841 a 0,149 mm), sendo 7 amostras para cada configuração. Para determinar a resistência do briquete, foi realizado os ensaios de tração por compressão diametral e abrasão.

### 2.3.1 Briquetagem

A compactação da borra de piaçava foi realizada em uma prensa hidráulica manual (marca Somar, capacidade de 15 toneladas), utilizando uma matriz de aço cilíndrica de 38 mm de diâmetro interno. Para a prensagem de cada briquete (Figura 2), foi utilizada 20 gramas da biomassa e uma carga de 12,9 toneladas (111,6 MPa) durante 30 segundos para a acomodação das partículas, sem aquecimento e adição de aglutinante, conforme HANSTED *et al.* (2016).



Figura 2 – Briquetes produzidos.

### 2.3.2 Ensaio de expansão longitudinal e densidade aparente do briquete

O ensaio de expansão longitudinal define o tempo mínimo de espera, após a briquetagem, para a realização dos ensaios de tração por compressão diametral e abrasão. Para isso, as amostras foram medidas com um paquímetro em seu diâmetro e altura em intervalos de 1, 2, 4, 6, 12, 24, 48 e 72 horas, conforme HANSTED *et al.* (2016), a fim de acompanhar a expansão longitudinal dos briquetes. Os briquetes foram armazenados em um dessecador para que não houvesse alteração do teor de umidade devido a fatores externos.

Após sete dias, os briquetes foram medidos e pesados para determinar a densidade aparente média ( $D_b$ , em g.cm<sup>-3</sup>) de cada configuração, conforme a Equação 7, onde  $M_b$  é a massa do briquete (em g) e  $V_b$  é o volume do briquete após sete dias de expansão (cm<sup>3</sup>).



$$cp_A = \frac{M_b}{V_b} \times 100\% \quad (7)$$

### 2.3.3 Ensaio de tração por compressão diametral

O ensaio de tração por compressão diametral simula o estresse compressivo devido ao peso dos briquetes superiores nos briquetes inferiores durante a estocagem. O ensaio foi realizado conforme adaptação da norma NBR 7222 (ABNT, 2011). O ensaio foi realizado em uma máquina universal de ensaios (EMIC DL-30000) com célula de carga de capacidade de 300 kN a uma velocidade de 3 mm/min. Com os resultados obtidos de força máxima, foi calculada a altura máxima de empilhamento para cada configuração, conforme as Equações 8 e 9 sugeridas por SILVA *et al.* (2015). A Equação 8 determina o número de briquetes empilhados verticalmente ( $N_{emp}$ ), onde  $FM_{rup}$  é a força máxima de ruptura do briquete (em kgf);  $f_s$  é o fator de segurança (adotou-se 300%) e  $M_b$  é a massa do briquete (adotou-se a média de 0,020 kg).

$$N_{emp} = \frac{FM_{rup}}{f_s \times M_b} \quad (8)$$

A Equação 9 determina a altura de empilhamento dos briquetes ( $H_{emp}$ , em m), onde  $N_{emp}$  é o número de briquetes empilhados verticalmente e  $\varnothing$  é o d diâmetro do briquete (adotou-se 3,8 cm).

$$H_{emp} = \frac{N_{emp}}{100} \quad (9)$$

### 2.3.4 Ensaio de abrasão

A resistência à abrasão foi determinada utilizando o método de tamboramento, estimando-se o índice de friabilidade. Para o ensaio de abrasão, foram utilizados três briquetes de cada configuração (B1, B2 e B3) após sete dias de produção. Os briquetes de mesma configuração foram colocados juntos em um friabilômetro (marca Ética, modelo 300) a uma rotação de 25 rpm por 20 minutos, conforme adaptação da norma NBR 8740 (ABNT, 1985). Em seguida, separou-se com uma peneira de 20 Mesh as partículas que se desprenderam dos briquetes, calculando-se o índice de friabilidade (F, em %) pela Equação 10, onde  $MB_i$  é o somatório das massas dos briquetes antes do ensaio (em g) e  $MB_f$  é a massa dos aglomerados dos briquetes retidos na peneira (em g).

$$cp_A = \frac{MB_i - MB_f}{MB_f} \times 100\% \quad (10)$$

Os resultados de caracterização da borra de piaçava e dos ensaios mecânicos dos briquetes produzidos foram comparados com as normas internacionais ISO 17225-

6 (ISO, 2014) para briquetes de materiais não lenhosos, e EN 14961-1 (ISO, 2010) para biocombustíveis sólidos (Tabela 3).

Especificação	ISO 17225-6	EN 14961-1
Densidade (kg.m-3)	≥ 600	≥ 600
Umidade (%)	≤ 12	≤ 10
PCS (MJ.kg-1)	≥ 14,5	≥ 16,5
Cinzas (%)	≤ 6	≤ 1,0
Friabilidade (%)	≤ 2	≤ 1,0

Tabela 3 – Padrões internacionais para briquetes.

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Classificação granulométrica

O resultado da classificação granulométrica do material (Figura 3) mostram que 19,75% do material moído (em vermelho) não se adequou ao tamanho de partícula favorável para a produção de briquetes. Além disso, 50,68% da borra de piaçava (63,15% do material aproveitado) apresentou granulometria maior que 0,297 mm (50 Mesh), com maior concentração de partículas retidas na peneira de 50 Mesh. A menor concentração de partículas inferiores a 100 Mesh pode estar associada ao tempo de moagem.

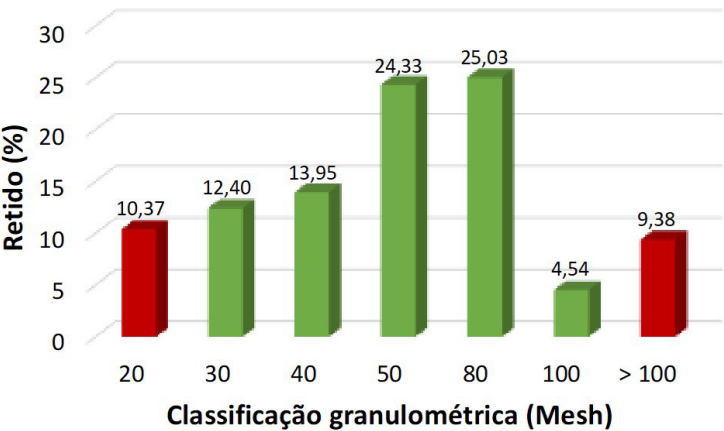


Figura 3 – Classificação granulométrica da borra de piaçava

Gonçalves *et al.* (2013) produziu briquetes com diferentes granulometrias e obteve melhor resistência à compressão para partículas de entre 0,84 e 0,15 mm. A granulometria

das partículas influencia diretamente na densidade dos briquetes, pois, quanto menor as partículas, maior a densidade do briquete, que lidará melhor com forças externas (PANWAR, *et al.*, 2011). Uma maior densificação traz maior resistência mecânica, que pode ser aumentada com o uso de diferentes tamanhos de partículas, o que aumenta a ligação entre elas (TRIPATHI *et al.*, 1998).

**3.2 Teor de umidade, Análise química imediata e Poder calorífico superior**

Os resultados do teor de umidade, análise química imediata e PCS da borra de piaçava são apresentados na Tabela 4. O teor de umidade (TU) atingido após a secagem foi de 10,08% e está de acordo com o padrão da ISO 17225-6, norma específica para briquetes de materiais não-lenhosos (menor que 12%).

Panwal *et al.* (2011) ao caracterizar de briquetes de serragem, observou que quando a umidade era superior a 13%, os briquetes apresentavam baixa densidade e se desintegravam com facilidade quando submetidos a pequenas forças de manuseio. Para teores menores que 4%, os briquetes perdiam qualidade, pois tendem a absorver a umidade do ar e se expandir, tornando-se frágeis. No percentual ideal, a água atua como agente aglutinante e lubrificante, devido à forças de Van der Waals geradas pela água e fibras, que aumentam a resistência e a durabilidade do briquete (KALIYAN E MOREY, 2008).

TU (%)	tV (%)	tc (%)	cf (%)	pcs (MJ.kg <sup>-1</sup> )
10,08 ± 0,78	75,75 ± 0,63	1,33 ± 0,35	22,92 ± 0,59	18,73 ± 1,00

Tabela 4 – Teores de umidade (TU), voláteis (TV), cinzas (TC) e carbono fixo (CF) em base seca, e poder calorífico superior (PCS) da borra de piaçava.

Observa-se que o teor de voláteis representou a maior fração dos constituintes da borra de piaçava, como é esperado de biomassas (DEMIRBAS, 2003). O teor de cinzas encontrado foi satisfatório, pois recomenda-se para briquetes um TC menor que 4%, a fim de evitar corrosão em equipamentos (TRIPATHI *et al.*, 1998), além de atender o padrão da ISO 17225-6 (menor que 6%). A relação CF/TV indica que a borra de piaçava tem boa estabilidade à chama durante a combustão, segundo VIRMOND *et al.* (2012). O PCS da borra de piaçava superou o de todos os resíduos lignocelulósicos listados na Tabela 1 e está de acordo com os padrões internacionais (maior que 16,5 MJ.kg<sup>-1</sup>).

**3.3 Densidade a granel e densidade do briquete**

A densidade dos briquetes (Tabela 5) chegou a atingir 3,6 vezes a densidade a granel média de 0,198 g.cm<sup>-3</sup> encontrada para a borra de piaçava, o que corresponde a um grau de densificação de 255%. ALMEIDA *et al.* (2017) ao estudar briquetes de bagaço de cana, obteve densificação de 247%. Considerando os padrões internacionais (maior que 600 kg.cm<sup>-3</sup>), a configuração B2 apresentou o melhor resultado de densidade, com um valor de 690 kg.m<sup>-3</sup>.

Configuração	B1	B2	B3
Densidade (kg.cm <sup>-3</sup> )	580 ± 20	690 ± 30	630 ± 20

Tabela 5 – Densidade dos briquetes de borra de piaçava.

### 3.4 Ensaio de expansão longitudinal

A curva de expansão longitudinal dos briquetes em função do tempo (Figura 4) mostra que todos os briquetes expandiram rapidamente logo após a liberação da pressão e atingiram estabilidade após 72h. Além disso, nota-se que a expansão dos briquetes segue um padrão logarítmico por um período de até 2 horas após a briquetagem.

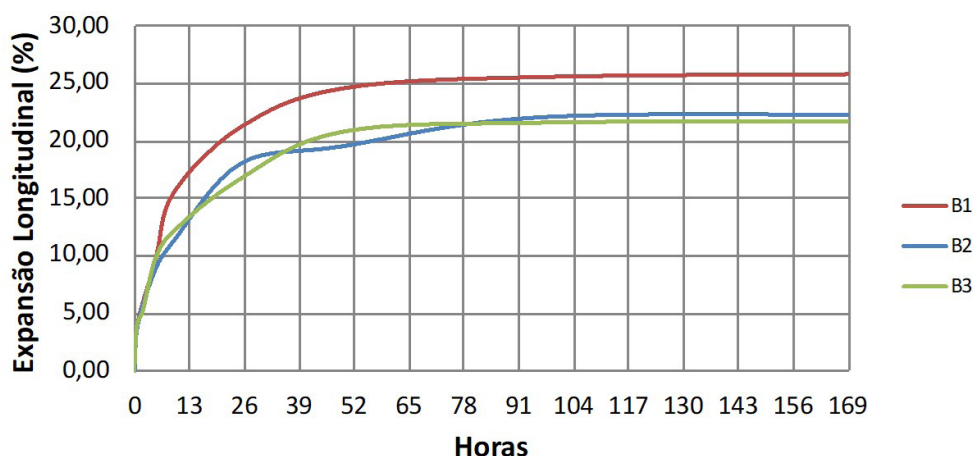


Figura 4 – Expansão longitudinal média dos briquetes.

Observa-se que a configuração B1 obteve a maior expansão, atingindo 25,93%, enquanto B2 e B3 obtiveram expansão final de 22,37% e 21,70%, respectivamente. Dessa forma, percebe-se uma relação direta entre a variabilidade do tamanho das partículas e a estabilidade dimensional do briquete. Antwi-Boasiako e Acheampong (2016) indicam que em 21 dias a 20 °C 95% de umidade relativa, uma expansão inferior a 30% é aceitável, e ideal quando inferior a 20%. Logo, todos os briquetes apresentaram uma expansão aceitável e a configuração B3 foi o mais estável.

### 3.5 Ensaio de tração por compressão diametral

Os resultados do ensaio de tração por compressão diametral (Tabela 6) mostram que a configuração B2 apresentou a maior resistência mecânica, 4,6 vezes superior a B1 e 1,9 vezes superior a B3. Este resultado está em consonância com o ensaio de densidade, visto que B2 obteve a maior densidade. O resultado também ratifica aquele obtido no ensaio

de expansão longitudinal, onde a configuração B1, que apresentou a menor estabilidade dimensional, demonstrou a menor resistência mecânica.

Configuração	B1	B2	B3
Força máxima (N)	84,69 ± 22,76	349,00 ± 41,06	184,77 ± 37,01
Resistência máxima (MPa)	0,05 ± 0,01	0,23 ± 0,04	0,12 ± 0,02
Altura máxima de empilhamento (m)	5,47	22,53	11,93

Tabela 6 – Força máxima, resistência máxima e altura máxima de empilhamento dos briquetes de borra de piaçava.

Quanto ao empilhamento dos briquetes, considera-se um empilhamento máximo de 10 metros, visto que os galpões de armazenamento não excedem esse valor (ABNT, 2011). Com isso, a altura máxima de empilhamento, considera-se que B2 e B3 apresentam ótimas condições para empilhamento.

### 3.6 Ensaio de abrasão

O resultado do ensaio de abrasão (Figura 5) mostra que todas as configurações apresentaram elevada friabilidade, não atendendo aos padrões internacionais, sendo classificadas como muito friáveis, segundo OLIVEIRA *et al.* (1982). Os valores encontrados são muito superiores ao índice que classifica o briquete como muito pouco friável (menor que 10%).

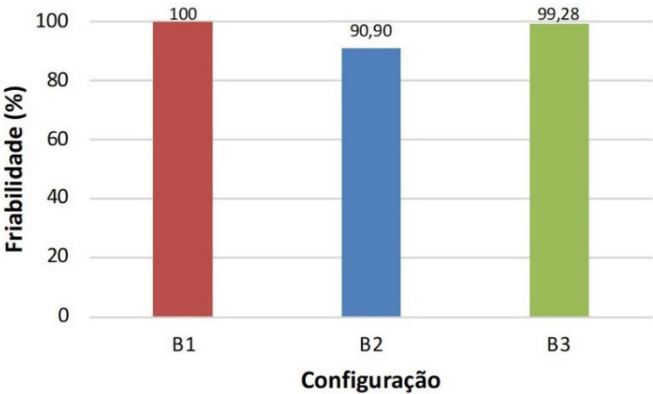


Figura 5 – Índice de friabilidade dos briquetes.

Esse resultado se deve processo de briquetagem utilizado, visto que durante a compactação da borra de piaçava, a lignina pode não ter atingido a temperatura de degradação da lignina na piaçava (cerca de 375 °C), que melhora a adesão entre as partículas (ALARU

*et al.*, 2011; D'ALMEIDA *et al.*, 2006). Em alguns processos produtivos, é realizada a briquetagem com pré-aquecimento, ativando os ligantes inerentes da biomassa ou aditivos. A elevação da temperatura promove a deformação plástica de partículas termoplásticas e as liga permanentemente, sendo limitada a 300 °C para evitar a decomposição da biomassa (GROVER E MISHRA, 1996).

Outra estratégia adotada é o tratamento de fibras resilientes com agentes químicos, como NaOH, CaO ou uréia, degradando a estrutura da parede celular e separando a lignina da celulose (THOMAS *et al.*, 1998). Entretanto, a seleção de aditivos e aglutinantes depende principalmente do custo e da compatibilidade ambiental (KALIYAN, N., MOREY, 2008). Em alguns países europeus, por exemplo, a adição de aglutinantes é proibida (OBERNBERGER E THEK, 2004).

## 4 | CONCLUSÕES

O presente trabalho revelou que a borra da piaçava é um resíduo promissor para ser utilizado como matéria-prima em briquetagem esse material, pois possui propriedades termoquímicas em consonância com os padrões internacionais, sendo superior a outros resíduos lignocelulósicos.

A configuração B2 obteve o melhor desempenho mecânico, o que implica em melhores condições de estocagem e manuseio, respectivamente. Ela também apresentou uma boa estabilidade dimensional. A configuração B1 obteve o pior desempenho nos ensaios, visto a influência do tamanho das partículas no desempenho mecânico dos briquetes.

Propriedades físicas, como densidade do briquete e teor de umidade, também estiveram em conformidade com os padrões internacionais. A correção da umidade da borra de piaçava se revelou prática, devido ao menor tempo necessário à correção em relação a outras fibras devido a sua inerente resistência à água, atingindo o teor de umidade requerido para briquetes após secagem em estufa por 2 horas à 100 °C.

O briquete de borra de piaçava pode ser otimizado em termos de durabilidade. Devido ao elevado índice de friabilidade de todas as configurações de briquetes produzidos, sugere-se, em estudos adicionais, avaliar a viabilidade da briquetagem com pré-aquecimento, tratamentos nas fibras ou uso de ligantes, a fim de melhorar a friabilidade dos briquetes.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia para a pesquisa e publicação.

## REFERÊNCIAS

ALARU, M., KUKK, L., OLT, J., MENIND, A., LAUK, R., VOLLMER, E., ASTOVER, A. **Lignin content and briquette quality of different fibre hemp plant types and energy sunflower.** Field Crops Research, v. 124, n. 3, p. 332-339, 2011.

ALMEIDA, L.F.P., SOLA, A.V.H., BEHAINNE, J.J.R. **Sugarcane bagasse pellets: characterization and comparative analysis.** Acta Scientiarum, v. 39, n. 4, p. 461-468, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E870-82: Standard Test Methods for Analysis of Wood Fuels.** West Conshohocken: ASTM, 2013.

ANTWI-BOASIAKO, C., ACHEAMPONG, B.B. **Strength properties and calorific values of sawdust-briquettes as wood-residue energy generation source from tropical hardwoods of different densities.** Biomass and Bioenergy, v. 85, p. 144-152, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6922: Carvão vegetal – ensaios físicos – determinação da massa específica (densidade a granel).** Rio de Janeiro: ABNT, 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8740: Carvão vegetal – Determinação do índice de quebra e abrasão.** Rio de Janeiro: ABNT, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7222: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

D'ALMEIDA, J.R.M., AQUINO, R.C.M.P., MONTEIRO, S.N. **Tensile mechanical properties, morphological aspects and chemical characterization of piassava (*Attalea funifera*) fibers.** Composites Part A, v. 37, n. 9, p. 1473-1479, 2006.

DEMIRBAS, A. **Combustion characteristics of different biomass fuels.** Progress in Energy and Combustion Science, v. 30, n. 2, p. 219-230, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 14961-1: Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 1 – General requirements.** London: CEN, 2010.

FELFLI, F.F., MESA, J.M., ROCHA, J.D., FILIPPETTO, D., LUENGO, C.A., PIPPO, W.A. **Biomass briquetting and its perspectives in Brazil.** Biomass and Bioenergy, v. 35, n. 1, p. 236-242, 2011.

GARCÍA, R., PIZARRO, C., ÁLVAREZ, A., LAVÍN, A.G., BUENO, J.L. **Study of biomass combustion wastes.** Fuel, v. 148, p. 152-159, 2015.

GONÇALVES, F.B., YAMAJI, F.M., FERNANDEZ, B.O., RÓZ, A.L., FLORIANO, F.S. **Caracterização e comparação entre diferentes granulometrias de serragem de *Eucalyptus grandis* para confecção de briquetes.** Revista do Instituto Florestal, v. 25, n. 2, p. 205-213, 2013.

GÓMEZ, Y.R., HERNÁNDEZ, R.C., GUERRERO, J.E., MEJÍA-OSPINO, E. **FTIR-PAS coupled to partial least squares for prediction of ash content, volatile matter, fixed carbon and calorific value of coal.** Fuel, v. 226, p. 536-544, 2018.

GROVER, P.D., MISHRA, S.K. **Biomass briquetting: technology and practice.** In: Report RWEDP - Regional Wood Energy Development Programme in Asia, 46, 1995, Bangkok. Proceedings [...]. Bangkok: Indian Institute of Technology - Delhi, 1995. p. 1-48.

HANSTED, A.L.S., NAKASHIMA, G.T., MARTINS, M.P., YAMAMOTO, H., YAMAJI, F.M. **Comparative analyses of fast growing species in different moisture content for high quality solid fuel production.** Fuel, v. 184, p. 180-184, 2016.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 17225-6: Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 6: Graded non-woody pellets.** Geneva: ISO, 2014.

JAIGANESH, V., NAGARAJAN, P.K., GEETHA, A. **Solid state bio methane production from vegetable wastes Current state and perception.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 40, p. 432-437, 2014

JOHANN, G., SANTOS, K.A., SILVA, E.A. **Determinação Experimental do Calor Específico das Folhas de Erva-Mate.** In: Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 21., 2016, Fortaleza. Anais [...]. Campinas: Galoá, 2018.

KALIYAN, N., MOREY, R.V. **Factors affecting strength and durability of densified biomass products.** Biomass and Bioenergy, v. 33, n. 3, p. 337-359, 2009

KUHE, A., IBIANG, F.A., IGBONG, D.I. **Potential of low pressure agricultural waste briquettes: An alternative energy source for cooking in Nigeria.** Journal of Renewable and Sustainable Energy, v. 5, n. 1, 2013.

OBERNBERGER, I., THEK, G. **Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behavior.** Biomass and Bioenergy, v. 27, n. 6, p. 653–669, 2004.

OLIVEIRA, J.B., FILHO, A.V., GOMES, P.A. **Produção de carvão vegetal: aspectos técnicos. Produção e utilização de carvão vegetal,** v. 8, Belo Horizonte: Editora CETEC, 1982.

PAMPONET, T.C., GOMES, F.P., ALMEIDA, A.F., MIELKE, M.S., GOMES, L.M.C., PEDROSA, A.M. **Photosynthetic characteristics and fibre production following defoliation in *attalea funifera* mart., arecaceae, growing under full sun and forest understorey.** Experimental Agriculture, v. 49, n. 3, p. 435-447, 2013.

PANWAR, V., PRASAD, B., WASEWAR, K.L. **Biomass Residue Briquetting and Characterization.** Journal of Energy Engineering, v. 137, n. 2, p. 108-114, 2010.

PIRRAGLIA, A., GONZALEZ, R., SALONI, D., WRIGHT, J., DENIG, J. **Fuel properties and suitability of *eucalyptus benthamii* and *eucalyptus macarthurii* for torrefied wood and pellets.** BioResources, v. 7, n. 1, p. 217-235, 2011.



SILVA, D.A., YAMAJI, F.M., BARROS, J.L., RÓZ, A.L., NAKASHIMA, G.T. **Caracterização de biomassas para a briquetagem.** Floresta, v. 45, n. 4, p. 713-722, 2015.

SRIVASTAVA, N.S.L., NARNAWARE, S.L., MAKWANA, J.P., SINGH, S.N., VAHORA, S. **Investigating the energy use of vegetable market waste by briquetting.** Renewable Energy, v. 68, p. 270-275, 2014.

THOMAS, M., VLIET, T., POEL A.F.B. **Physical quality of pelleted animal feed. 3. Contribution of feedstuff components.** Animal Feed Science Technology, v. 1-2, p. 59-78, 1998.

TRIPATHI, A.K., IYER, P.V.R., KANDPAL, T.C.A. **A techno-economic evaluation of biomass briquetting in India.** Biomass and Bioenergy, v. 14, n. 5, p. 479-488, 1998.

VIRMOND, E., DE SENA, R.F., ALBRECHT, W., ALTHOFF, C.A., MOREIRA, R.F.P.M., JOSÉ, H.J. **Characterisation of agroindustrial solid residues as biofuels and potential application in thermochemical processes.** Waste Management, v. 32, n. 10, p. 1952-1961, 2012.

## STRUCTURAL OPTIMIZATION OF A NOSE LANDING GEAR FOR CESSNA 172 AIRPLANE

*Data de aceite: 01/06/2021*

*Submission date: 28/02/2021*

**Raphael Basilio Pires Nonato**

CEFET/RJ, Mechanical Engineering  
Department

Nova Iguaçu – RJ

<http://lattes.cnpq.br/9331089672178927>

**Alexander Dias Lopes**

CEFET/RJ, Mechanical Engineering  
Department

Nova Iguaçu – RJ

<http://lattes.cnpq.br/7024024366143552>

**ABSTRACT:** The landing gear assembly is one of the most important aircraft systems because it is the first interface with the ground at the time of landing, supporting individually great part of the impact load that is applied on the aircraft at this instant. Therefore, this system must be provided with a certain security level to perform such a task, however without adding too much mass to the aircraft, i.e. it must be robust enough to support the referred efforts, without aggregating mass enough to increase the fuel consumption to non-acceptable levels. Hence, the structural optimization is necessary, aiming at minimizing the masses of the system components. In this paper, the nose landing gear fork of CESSNA 172 airplane is designed and subjected to a size optimization (minimizing its mass). From the free body diagram analytical and computational calculations (applying the Finite Element Method)

are performed, the latter method being the basis for the structural optimization. Based on the initial design, the results show that the mass has the potential to be reduced at about 33.13%, making the component lighter and, therefore, bringing a reduction in the operational cost of the referred aircraft.

**KEYWORDS:** Structural optimization, structural analysis, landing gear, Cessna.

### 1 | INTRODUCTION

Due to globalization, the international relations have intensified, and consequently, the need for faster and more efficient means of transportation for medium and large distances has been growing. Consequently, the number of aircrafts in the Brazilian and global fleets in the next years tends to increase. For example, in 2014, there were 15210 registered aircrafts in Brazil; Six years later, the number has reached 28142 unities, representing an increase of more than 85%, according to ANAC (2020). In view of that, the demand for design, manufacturing, logistics, planning, infrastructure, and other activities directly and indirectly associated to this sector tends to follow this behavior.

In this industry, the primary operational guidelines are safety and economy, which, in some situations, represent a tough dichotomy. Therefore, one of the solutions frequently proposed in this scenario is the optimization. In order to work at the limit of optimal acceptable

and feasible solutions, the objective is to keep a safe design observing the current standards concomitantly with the lowest mass and aerodynamic profile best suited to the function it performs.

In the context of safety, one of the most critical systems of an aircraft is the landing gear because it promotes the first interaction with the ground at the time of landing, supporting individually great part of the impact load applied on the aircraft at this moment. From this understanding, this system must be provided with an adequate security level to perform this type of task, however without adding excessive mass to the aircraft, i.e. it must have the robustness to attend safety/service requirements, without aggregating mass enough to affect the economy of the operation. According to Federal Aviation Administration (FAA) (2012), about 55% of aircraft failures occurred in landing and takeoff maneuvers. From this perspective, the landing gear is the essential intermediation between the landing and the catastrophe, as mentioned by Currey (1988).

### 1.1 Background and Fundamental Concepts

The first Cessna 172 was manufactured in 1956, in which the tricycle configuration represented the improvement of this model compared to the 170. This then new arrangement of wheels provided greater stability at the time of landing the airplane. The referred model can be seen in Figure 1.



Figure 1. Cessna 172. Source: Smith (2010).

This airplane is a light single-engine, equipped with tricycle landing gear, and can carry four passengers, including the pilot. Its manual also informs that the maximum landing mass is 1091 kg and its load factor is 3. This model is still used in the most diverse aviation branches, from agriculture to warlike industry.

### 1.2 Landing Gear System

This system is commonly classified according to two branches: its localization related to the gravity center and the number of wheels. Raymer (1989) lists the existing configurations, highlighting that the most applied one is the tricycle, which has a wheel

ahead of the gravity center (near the airplane nose, reason why it is called nose landing gear). The set of two wheels behind the gravity center is denominated main landing gear (see Figure 1).

The components of a nose landing gear are shown in Figure 2. The role of the cylinder-piston assembly is to connect the entire system to the airplane structure and damp the impact of the landing, absorbing part of the energy and transferring part to the airplane structure. The upper and lower locating cams fit to provide guidance to have the wheel axle orthogonal to the longitudinal axle of the airplane. The torque arms help the cylinder-piston assembly to keep the alignment of the fork, while the latter houses the axle and wheel. At a specific moment of landing, the wheel touches the ground and the load is transferred to the axle, which propagates it to the fork (the scope of calculation of this paper), transmitting the efforts to the cylinder-piston assembly and to the torque arms.

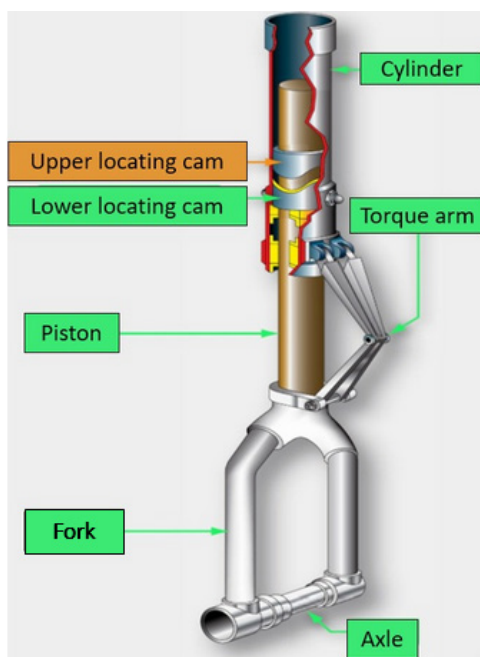


Figure 2. Main components of the nose landing gear of a Cessna 172. Source: FAA (2012).

The following formulation is based on the premise that the landing process is performed on three wheels. This type of landing is characterized by equally distributing the impact loading from the ground, which can be calculated by Equation 1, according to FAA (2002):

$$F_{MAX} = m_{MAX} g F_L, \quad (1)$$

where  $m_{MAX}$  is the maximum allowed mass to proceed to a landing process,  $F_L$  is the load factor, and  $g$  is the gravity acceleration. Due to this loading, two main forces arise: one horizontal  $F_H$  directed backwards the airplane, another vertical  $F_V$  directed upwards, respectively given by Equations 2 and 3, according to FAA (2002):

$$F_H = 0.4 F_V, \quad (2)$$

$$F_V = 0.15 F_{MAX}. \quad (3)$$

These loads constitute the main input data to the calculation presented in this paper, which scope is the fork optimization. According to the load path related to the landing process, the axle provides the input load to the fork. Besides that, the opening width and height are dictated by the wheel assembly (which includes the wheel, axle, washers, spacers, etc.).

### 1.3 Optimization

This branch is concerned with exploiting the available limited resources maximizing the output, according to Haftka and Gürdal (1991). The minimum weight design was probably applied in large extent by the aerospace industry, where manufacturing cost is not a priority. While the objective function  $f(\mathbf{x})$  is the scope of improvement and can be a measure of the design effectiveness, the constraints impose limits on quantities related to the design. Mathematically, Equation 4 gives the standard formulation:

$$\begin{aligned} \min \quad & f(\mathbf{x}) \\ \text{such that } & p_j(\mathbf{x}) = a, \quad j = 1, \dots, n_p, \\ & q_k(\mathbf{x}) \leq b, \quad k = 1, \dots, n_q, \\ & x_i^L \leq x_i \leq x_i^U, \quad i = 1, \dots, n_r, \end{aligned} \quad (4)$$

Where  $\mathbf{x}$  represents a vector of design variables  $x_i$ , such that  $i = 1, \dots, n_r$ . There are  $n_p$  equality constraints  $p_j(\mathbf{x})$  equal to a constant “a”,  $n_q$  inequality constraints  $q_k(\mathbf{x})$  less-than a constant “b”, and  $x_i^L$  and  $x_i^U$  are the lower and upper bounds of the design variable  $x_i$ . The feasible domain corresponds to the set of design variables that satisfy the constraints imposed.

Potra and Simiu (2010) introduced a multihazard structural design problem in nonlinear programming. This was performed for an example of four design variables and two hazards (strong winds and earthquake). Gandomi et al. (2011) solved mixed continuous/discrete structural optimization problems by means of a metaheuristic optimization algorithm, the firefly algorithm (FA). Hasançebi et al. (2013) developed a novel algorithm employing a numerical optimization technique that uses the echolocation behavior of bats in seeking a design space for structural optimization. Russo and Rizzi (2014) proposed the

integration between life cycle assessment tools and a computer-aided methodology, based on the integration of structural optimization. The life cycle mapping tool was developed to trace the growth of environmental impacts throughout the product's life cycle. Zhao et al. (2017) performed a structural optimization of a downhole oil-water separator consisting of two series de-oiling hydrocyclones. A combination of methods was made to improve the geometry and, consequently, the separation performance.

Sandal et al. (2018) presented an approach for sizing optimization (mass minimization) with the application to jackets for offshore wind turbine, which constraints were fatigue and ultimate limit states. Bucher (2018) discussed strategies to have a suitable response surface model, evaluating its quality prediction, and discerning about important and unimportant variables. Thore et al. (2019) proposed a topology structural optimization with uncertainty consideration, comparing three solution concepts: Pareto optima, Stackelberg equilibria, and Nash equilibria. Zhao et al. (2020) introduced a novel approach based on the graph theory and the set theory aiming at controlling the number and size of interior holes of the structures.

Therefore, structural optimization plays an important role in the society because it aims at providing enough safety associated with the lowest possible cost. One of the main difficulties is often addressed to develop and implement a tailor-made algorithm in order to reflect the specific circumstances of the design.

## 2 | MATERIALS AND METHODS

The analysis of the fork assumed some premises in order to simplify and turn it feasible. The main assumptions are based on thermodynamics, manufacturing processes, and natural principles. Just to mention some of them, the process of deformation is considered isothermal and isochoric, the material homogeneous and isotropic, and that Saint Venant's principle is observed (pertinent concentration factors are taken into account). The component is made of AISI 4130 steel, normalized at 870°C, exception made for the region of the holes of the interface with the axle and the holes to assembly the piston-cylinder assembly, which are suddenly cold when the heating reaches 855°C (quenching process). The material properties of this component are presented in Table 1.

Quantity		Magnitude		Magnitude
Brinell hardness (HB)	NORMALIZED PART	163	QUENCHED PART	241
Ultimate tensile strength (MPa)		615		841
Yield tensile strength (MPa)		435		655
Modulus of elasticity (GPa)		205		205
Poisson's ratio		0.29		0.29
Elongation at break (%)		27.0		20.5
Reduction of area (%)		61.2		63.6

Table 1. Fork material properties (AISI 4130). Source: Matweb (2020).

## 2.1 Free Body Diagram

This mapping of actuating loads aims at obtaining the input to the analytical calculation and to the finite element analysis (FEA) conducted to produce the topological optimization. The specific condition in which this design is executed is the exact moment of the landing, which can be initially represented by the wheel touching the ground. This produces the horizontal  $F_H$  and vertical  $F_V$  loads on the wheel, described by Equations 2 and 3, respectively. This action pushes the wheel against the axle (producing contact, shear, and bending loading), which in its turn acts on the fork (with bending, compression, torsion, contact, and buckling effects). The latter induces compression, contact, and bending on the piston-cylinder assembly, being the load transferred to the main structure of the airplane (transferring torsion, bending, contact, and compression).

The free body diagram of the fork is shown in Figure 3, in which the nomenclature is understood as follows: variables initiating with letter “R” stand for reaction forces; “F” for applied loads; “M” for reaction moments; and “T” for applied moments. The main dimensions of this component are symbolically represented in Figure 4. Complementarily, Table 2 shows the geometrical and loading magnitudes related to these symbols.

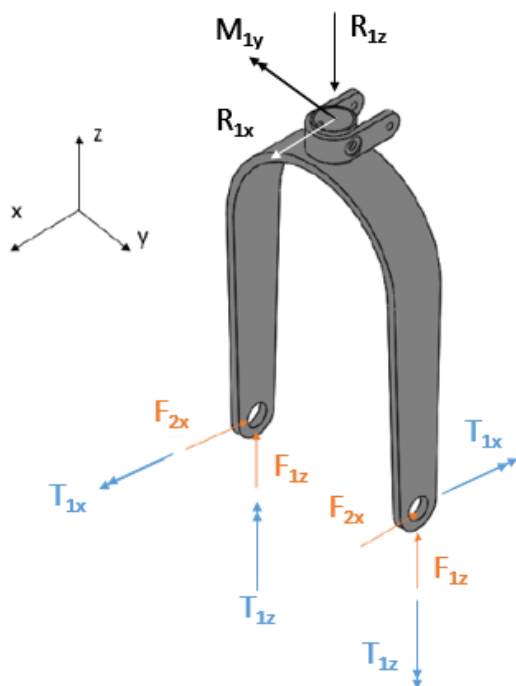


Figure 3. Free body diagram of the fork. Source: own authorship (2020).

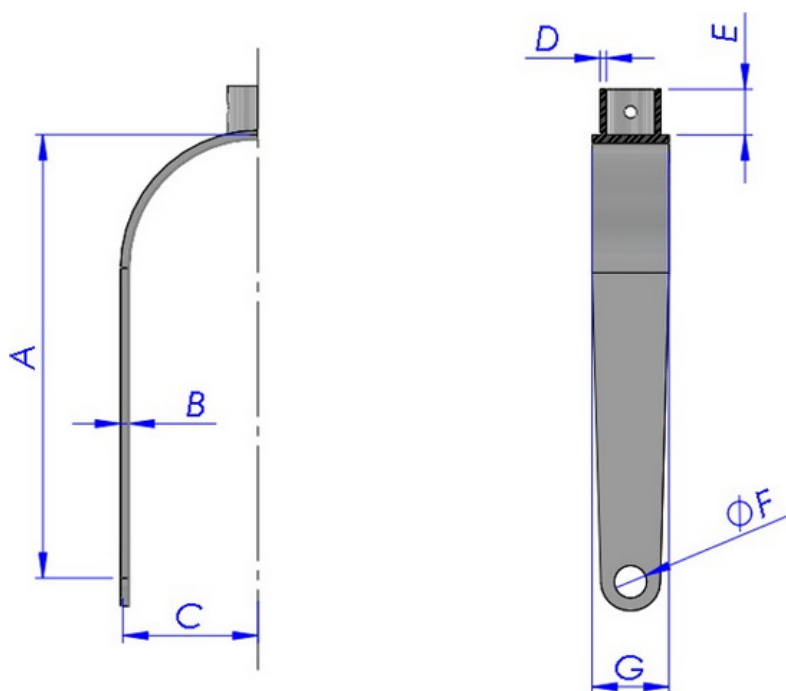


Figure 4. Main dimensions of the fork. Source: own authorship (2020).



GEOMETRICAL	Quantity	Magnitude (mm)
	A	292
	B	5.56
	C	89
	D	4
	E	30
	F	21.3
	G	50.8
LOADING	Quantity	Magnitude (N)
	Force $F_{1x}$	122.5
	Force $F_{1z}$	306.0
	Quantity	Magnitude (Nmm)
	Moment $T_{1x}$	13008
	Moment $T_{1z}$	5210

Table 2. Values of the geometrical and loading quantities. Source: own authorship (2020).

## 2.2 Analytical Calculation and Finite Element Analysis (FEA)

The classical mathematical expressions from mechanics of materials were used to perform the analytical calculation for stresses and safety factors. The stress concentration factor is associated to the mean actuating stress to reflect the stress concentration phenomenon. The potentially critical infinitesimal elements selected are under plane stress state. The location followed by the types of actuating stresses are listed: (a) lower holes (interface with the axle): contact; (b) transition from the legs to the cylinder: bending, torsion, and compression; (c) upper holes (interface with the piston-cylinder assembly): compression, bending, torsion, and contact; (d) legs: buckling, compression, bending, and torsion.

Therefore, the equations applied in this work for the analytical calculation are the following: contact, bending, torsion, and compression stresses, and critical load from buckling, which are given, respectively, by Equations 4, 5, 6, 7, and 8. Besides that, it's considered the wheel doesn't absorb any part of the load impact.

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A_p}, \quad (4)$$

$$\sigma_B = \frac{M_B y}{I}, \quad (5)$$

$$\tau_T = \frac{M_T r}{I_p}, \quad (6)$$

$$\sigma_{COM} = \frac{F}{A}, \quad (7)$$

$$F_{CRI} = K_B \left( \frac{\pi}{L} \right)^2 E I, \quad (8)$$

In which  $F_c$  is the contact force and  $A_p$  is the area of a component projected on the other.  $M_B$  is the bending moment,  $y$  is the distance between the neutral axle and the fiber to calculate, and  $I$  is the moment of inertia related to the rotation axle.  $M_T$  is the torsion moment,  $r$  is the radius of the region under torsion, and  $I_p$  is the polar moment of inertia.  $F$  is the force normal to the analyzed plane and  $A$  is the area under compression (which normal to the plane under analysis is parallel to the compression force vector and opposite in direction to it).  $K_B = 1$  (one end fixed, another free to displace) is the support condition for buckling,  $F_{CRI}$  is the critical load magnitude to provoke the buckling phenomenon,  $L$  is the leg length, and  $E$  is the elasticity modulus.

These regions present stresses combined such that they should be expressed in terms of principal stresses to apply a failure criterion. In this work, von Mises theory was used to calculate the safety factor  $N$  (Equation 9) of the infinitesimal elements listed under this topic based on yield strength  $S_Y$ :

$$N = \frac{S_Y}{\left( \sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2 \right)^{\frac{1}{2}}} = \frac{S_Y}{\sigma_{VM}}, \quad (9)$$

Where  $\sigma_{VM}$  is the von Mises stress,  $\sigma_1$  and  $\sigma_2$  are the maximum and minimum principal stresses, respectively.

Once the analytical calculation was done, a finite element analysis (FEA) was conducted in COSMOSWorks® software, which results were given in terms of stresses and displacements. The analysis observed the conditions presented by the free body diagram, where material parameters were taken from Table 1, and geometrical and loading parameters were extracted from Table 2.

### 2.3 Optimization Problem

The problem to solve in this paper refers to a size optimization of the thickness of the fork legs, intending to minimize the mass of this component. The black-box algorithm of the software COSMOSWorks® was used for this intent. All the boundary conditions were inserted on, the objective set to be the minimization of the mass subjected to constraint of maximum von Mises stress (290 MPa) found in the most critical region of the legs, i.e. the upper part connected to the cylinder. Due to the fact that the selected manufacturing final process of the fork is the welding (the cylinder is welded to the legs), after the mass is minimized, a standardization to the closest upper fraction of denominator 32 of inch is

made, allowing the acquisition of a standard available thickness, decreasing its cost and facilitating eventual substitutions.

### 3 | RESULTS AND CONCLUSIONS

The free body diagram shown in Figure 3 and the data contained in Tables 1 and 2 were input for the optimization performed. The finite element analysis performed is represented graphically in Figures 5 (mesh in the region of the holes that house the axle), 6 (mesh in the region of transition between the cylinder and the legs), 7 (stress in transition cylinder-legs), 8 (stress filtered equal or greater than 290 MPa), and 9 (total displacement).



Figure 5. Mesh for the transition lower holes-legs of the fork. Source: own authorship (2020).

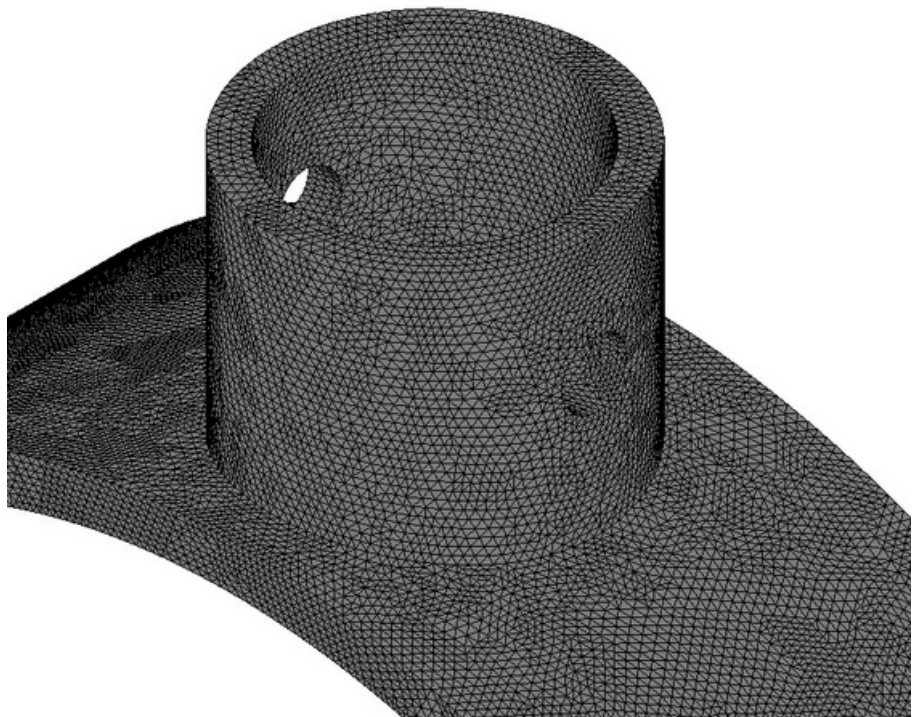


Figure 6. Mesh for the transition cylinder-legs of the fork. Source: own authorship (2020).

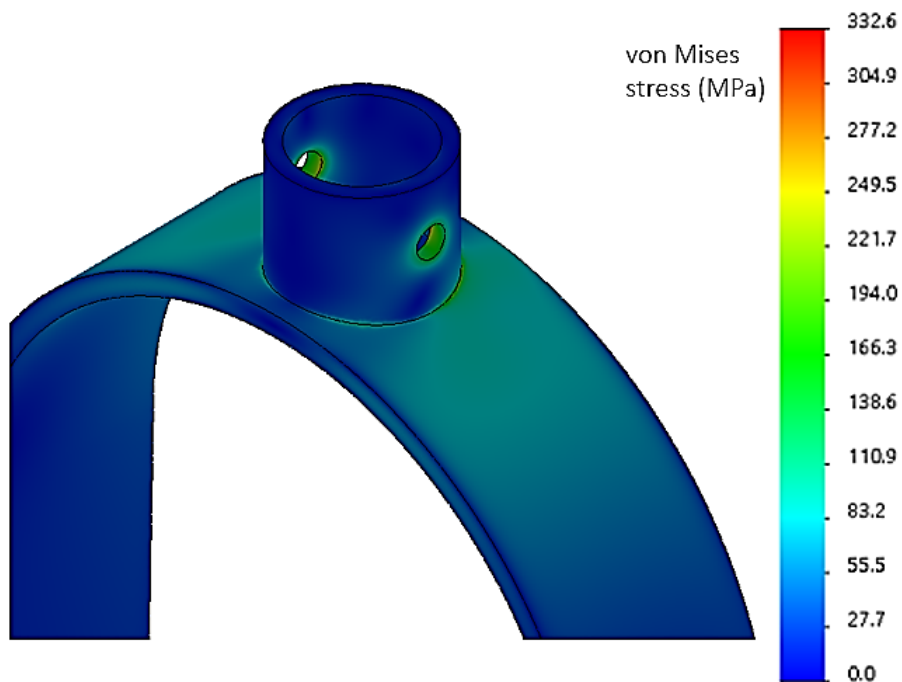


Figure 7. Stress in transition cylinder-legs. Source: own authorship (2020).

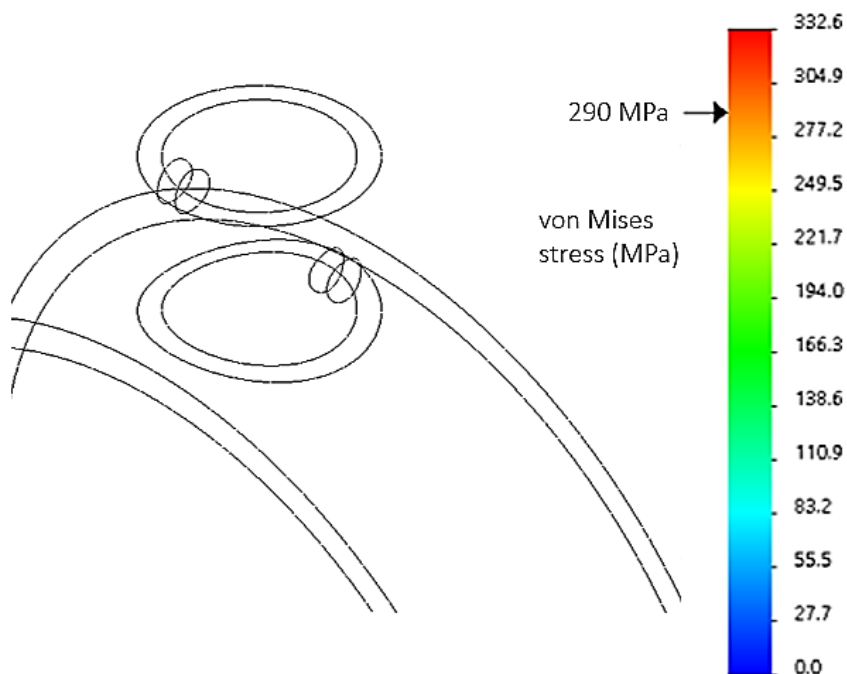


Figure 8. Stress filtered equal or higher than 290 MPa. Source: own authorship (2020).

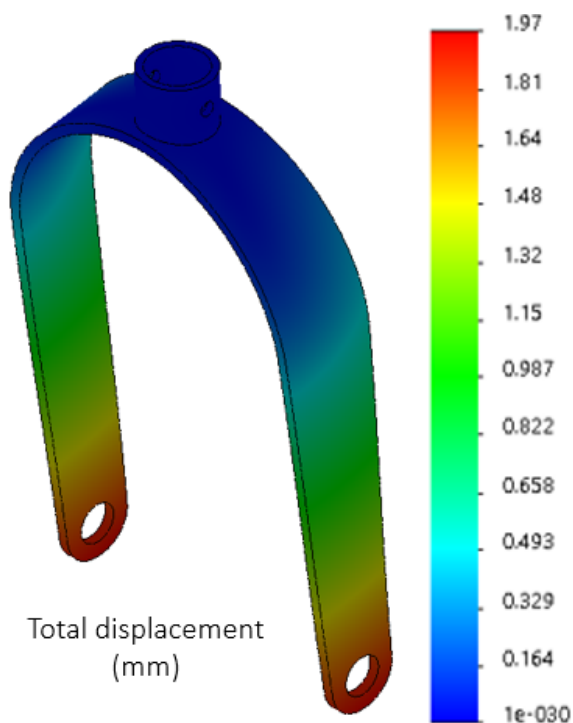


Figure 9. Total displacement of the fork. Source: own authorship (2020).

The last five figures refer to results after the optimization process. The largest and the smallest sizes of the tetrahedral finite elements used are 1 and 0.2 mm, respectively (using the curvature-based mesh). Therefore, as can be noted in Figure 8, the stress is not greater than 290 MPa, except for some singularities in the hole of the cylinder and in the transition between the cylinder and the legs.

The initial design had an initial thickness of 7.94 mm (5/16 in), which corresponds to a maximum von Mises stress of 153.36 MPa (safety factor  $N = 2.84$ ), and to a mass of 2160.51 g. After three iterations, the algorithm returned the optimal output of mass (1444.63 g), corresponding to a thickness of 5.48 mm and to a maximum stress of 290 MPa (safety factor  $N = 1.5$ ). In order to use a standard thickness of raw plate, the thickness was then selected to be 5.56 mm (7/32 in). After performing the simulation for this new thickness, the maximum von Mises stress found was 284.70 MPa (safety factor  $N = 1.53$ ), and the final result for the mass was 1536.13 g, which represents a mass reduction of 33.13% (see Table 3 for further details of other iterations).

Quantity	Initial	Iteration 1	Iteration 2	Optimal	Standardized
Thickness (mm)	7.94	3.97	11.91	5.48	5.56
Stress (MPa)	153.36	410.25	86.35	290.00	284.70
Mass (g)	2160.51	1123.82	3216.96	1444.63	1536.13

Table 3. Optimization iterations for fork. Source: own authorship (2020).

These results address that as the thickness was reduced, the stresses increased and the mass decreased. Due to the fact that the optimization process has not included the shape in its work scope, the mass of the fork still has potential for optimization. In view of this, future improvements of this work can be done by studying a complete topology optimization of the component.

From all the above, it is concluded that the structural optimization has achieved its objectives in what refers to the size (thickness), what provided a mass reduction of about 33.13%. In addition, the thickness of the plate was standardized aiming at facilitating the acquisition of the raw material to manufacture it.

## REFERENCES

ANAC: **Aircraft database**. Available in: < [https://www.anac.gov.br/assuntos/ setor-regulado/ aeronaves/ rab/relatorios-estatisticos](https://www.anac.gov.br/assuntos/setor-regulado/aeronaves/rab/relatorios-estatisticos)>. Access on: 20 sep. 2020.

BUCHER, C. **Metamodels of optimal quality for stochastic structural optimization**. Probabilistic Engineering Mechanics, v. 54, p. 131-137, 2018.

CESSNA: 172 S NAV III: **information manual**. Available in: < <http://aeroatlanta.com/docs/aero-atlanta-c172sp-naviii-poh.pdf>>. Access on: 26 feb. 2020.

CURREY, N. **Aircraft landing gear design**: principles and practices. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington, USA, 392 p., 1988.

FAA. FAR-PART 23.2305: Airworthiness standards: **acrobat category airplanes**. Available in: < [https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=685dc1ae97ae3f5e5569e47880fab01e&mc=rue&node=pt14.1.23#se14.1.23\\_12305](https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=685dc1ae97ae3f5e5569e47880fab01e&mc=rue&node=pt14.1.23#se14.1.23_12305)>. Access on: 26 feb. 2020.

FAA: Handbooks manuals, chapter 13: **aircraft landing gear systems**. Available in: < [https://www.faa.gov/regulations\\_policies/handbooks\\_manuals/aircraft/media/amt\\_airframe\\_hb\\_vol\\_1.pdf](https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aircraft/media/amt_airframe_hb_vol_1.pdf)>. Access on: 20 jan. 2020.

GANDOMI, A. H.; YANG, X-S.; ALAVI, A. H. **Mixed variable structural optimization using Firefly algorithm**. Computers and Structures, v. 89, p. 2325-2336, 2011.

HAFTKA, R. T.; GÜRDAL, Z. **Elements of structural optimization**. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 502 p., 1991.

HASANÇEBİ, O.; TEKE, T.; PEKCAN, O. **A bat-inspired algorithm for structural optimization**. Computers and Structures, v. 128, p. 77-90, 2013.

MATWEB: **Material properties of AISI 4130 normalized at 870°C**. Available in: <<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=c2decafd41b94684bf6f9114ff3cb661&ckck=1>>. Access on: 13 may. 2020.

MATWEB: **Material properties of AISI 4130 water quenched at 855°C**. Available in: < <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ac4f5d5520754966925563d4437e07a6>>. Access on: 13 may. 2020.

POTRA, F. A.; SIMIU, E. **Multihazard design: structural optimization approach**. J. Optim. Theory Appl., v. 144, p. 120-136, 2010.

RAYMER, D. P. **Aircraft design: a conceptual approach**. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington, USA, 1062 p., 1989.

RUSSO, D.; RIZZI, C. **Structural optimization strategies to design green products**. Computers in Industry, v. 65, p. 470-479, 2014.

SANDAL, K.; VERBAT, A.; STOLPE, M. **Conceptual jacket design by structural optimization**. Wind Energy, v. 21, p. 1423-1434, 2018.

SMITH, R. **Cessna 172: a pocket history**. Amberley Publishing, Gloucestershire, England, 128 p., 2010.

THORE, C-J.; GRUNDSTRÖM, H. A.; KLARBRING, A. **Game formulations for structural optimization under uncertainty**. Int. J. Numer. Methods Eng., v. 121, p. 165-185, 2019.

ZHAO, C.; SUN, H.; LI, Z. **Structural optimization of downhole oil-water separator**. Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 148, p. 115-126, 2017.

ZHAO, Z-L.; ZHOU, S.; CAI, K.; XIE, Y. M. **A direct approach to controlling the topology in structural optimization**. Computers and Structures, v. 227, p. 106-141, 2020.



# CAPÍTULO 4

## AVALIAÇÃO DO GRAU DE SENSITIZAÇÃO E O APARECIMENTO DE FASES INTERMETÁLICAS EM TRECHO DE TUBULAÇÃO DE FORNO DE COQUEAMENTO RETARDADO

*Data de aceite: 01/06/2021*

### **Thiago Batista David**

Centro Universitário Estácio do Recife  
(ESTÁCIO-PE); Departamento Engenharia  
Mecânica  
Carpina-PE  
<http://lattes.cnpq.br/2742652536623661>

### **Erike Wilker Arruda Figueredo**

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE);  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Recife-PE  
<http://lattes.cnpq.br/9737388520834184>

### **Fillipe Stephany de Souza Virgolino**

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE);  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Recife-PE  
<http://lattes.cnpq.br/6622866489872495>

### **Luiz Adeildo da Silva Junior**

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE);  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Vitória de Santo Antão – PE  
<http://lattes.cnpq.br/6842148949752939>

### **Moisés Euclides da Silva Junior**

Centro Universitário Estácio do Recife  
(ESTÁCIO-PE); Departamento Engenharia  
Mecânica  
Recife-PE  
<http://lattes.cnpq.br/9524894169629954>

**RESUMO:** Tubulações internas de fornos em operação são expostas a altas temperaturas e à presença de gases de combustão podem causar diversos mecanismos de danos, conforme o tipo de material que esteja instalado no projeto. Tais condições de operação precisam ser acompanhadas de inspeções periódicas por meio de técnicas de inspeção e de monitoramento. Diante disso, este trabalho tem o objetivo avaliar o comportamento microestrutural e mecânico de um trecho de tubo da câmara de combustão de um forno produzido do aço inoxidável 321L estabilizado. Nesta linha, foi realizada análise metalográfica para observar se existe algum mecanismo de dano ativo após 3,5 anos de operação do equipamento, sendo avaliado o lado interno, externo e o centro do tubo. Pelo lado interno foi observado pontos de corrosão concentrados ao longo dos contornos de grão, característico da corrosão intergranular. Na face externa foi encontrado pontos de corrosão relacionados com a presença de óxido de enxofre encontrados nos gases de combustão do forno. Na seção transversal foi identificado a formação da fase sigma. A análise de dureza do material nas regiões central, interna e externa foi verificada e os valores apresentados não revelaram uma redução significativa. Conclui-se que o tubo do aço 321L apresenta sensitização, já apresentando corrosão intergranular em aproximadamente 250 microns de profundidade devido difusão grande quantidade de carbono presente no fluido de operação, ocorrência de fase sigma ocasionada devido ao longo tempo de exposição a altas temperaturas de operação e em parte pelo próprio processo de fabricação

do tubo em questão, além do contato direto com os compostos de enxofre que levaram a oxidação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Aço inoxidável 321L, corrosão intergranular, fase sigma.

## EVALUATION OF THE DEGREE OF SENSITIZATION AND THE APPEARANCE OF INTERMETALLIC PHASES IN SECTION OF RETARDED COKING OVEN PIPE ABSTRACT

**ABSTRACT:** Internal furnace pipes in operation are exposed to high temperatures and the presence of combustion gases can cause several damage mechanisms, depending on the type of material that is installed in the project. Such operating conditions need to be accompanied by periodic inspections using inspection and monitoring techniques. Therefore, this work aims to evaluate the microstructural and mechanical behavior of a section of the combustion chamber tube of an oven produced from stabilized 321L stainless steel. In this line, metallographic analysis was carried out to see if there is any mechanism of active damage after 3.5 years of operation of the equipment, being evaluated the internal, external side and the center of the tube. From the inside, corrosion spots were observed along the grain contours, characteristic of intergranular corrosion. On the external face, corrosion points were found related to the presence of sulfur oxide found in the combustion gases of the furnace. In the cross section, the formation of the sigma phase was identified. The analysis of material hardness in the central, internal and external regions was verified and the values presented did not reveal a significant reduction. It is concluded that the 321L steel tube presents sensitization, already presenting intergranular corrosion in approximately 250 microns of depth due to the diffusion of a large amount of carbon present in the operating fluid, occurrence of sigma phase caused due to the long time of exposure to high operating temperatures. and partly due to the manufacturing process of the tube in question, in addition to the direct contact with the sulfur compounds that led to oxidation.

**KEYWORDS:** Stainless steel 321L, intergranular corrosion, sigma phase.

## 1 | INTRODUÇÃO

A área de refino de petróleo contém diversos estudos sobre os danos causados por contaminantes presentes na carga que normalmente não são encontradas nos demais setores (GUIMARÃES, 2006; GONÇALVES, 2007; LUCCHESI, 2010). Como exemplo de contaminantes, podemos destacar os que são trazidos com a matéria prima petróleo tais como, o  $H_2S$  (Sulfeto de Hidrogênio), os ácidos naftênicos, HCl (ácido clorídrico) dentre outros, que levam as refinarias a adotarem materiais adequados para as respectivas temperaturas e pressões envolvidas. Estes contaminantes presentes na carga podem atuar como agravadores dos mecanismos de danos já conhecidos e mapeados na norma API 571 (American Petroleum Institute). Diante de diversos mecanismos que podem ocorrer em cada meio, a escolha de material adequado para cada caso se torna cada vez mais importante para aumentar a confiabilidade e segurança de operação.

No caso de avaliação de uma serpentina (tubulação interna) de um forno de coque, onde existe contaminantes e temperaturas elevadas, onde podem ocorrer danos como carbonetação, fluência, sulfetação entre outros, a técnica de metalografia se torna uma opção para detectar qual mecanismo está ativo no material, por ser uma técnica que tem a missão de revelar características da microestrutura do material (COLPAERT, 2008; API 571, 2003).

Os aços inoxidáveis também podem apresentar o fenômeno de sensitização, quando trabalhando em elevada temperatura, isto é, favorecendo a ocorrência de precipitação de carbeto de cromo nos contornos de grãos do material, deixando o material susceptível a corrosão intergranular nessas regiões (TELLES, 2003).

Alguns aços podem passar pelo processo de estabilização para melhorar resistência ao fenômeno de sensitização. Esse processo consiste em adicionar Nb (Nióbio) ou Ti (Titânio) aos aços inoxidáveis 347 e 321, respectivamente, no sentido de se combinarem com o carbono livre, reduzindo a combinação do Cr (Cromo) com o C (Carbono) (FARIA *et al.*, 2016).

Por outro lado, o processo de estabilização ocorre na faixa de temperatura entre 817°C a 870°C por um certo tempo. Essa temperatura está incluída no range de ocorrência de uma outra fase indesejável, denomina fase sigma, que costuma ocorrer entre 580°C a 900°C com materiais que contenham mais de 17% de cromo e que também permaneçam por um certo tempo (VIOTO, 2016; e TELLES, 2003). Este fato leva a crer que os aços inoxidáveis estabilizados podem apresentar alguma fase sigma de forma inevitável.

A parte externa do tubo do forno pode estar sujeita ao fenômeno de sulfetação e/ou oxidação por estar exposto a chama de um gás que pode conter compostos de enxofre e temperaturas acima de 260°C (PELLICCIONE *et al.*, 2012).

A fluência também é um dano que pode ocorrer neste caso devido a temperatura, tempo e tensão elevadas, causando nucleação e propagação de vazios no material, e, posteriormente, rompimento do material (ASKELAND e WRIGHT, 2014).

## 2 | MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho tem como objetivo principal a análise da existência de sensitização/carbonetação e/ou surgimento da fase sigma e outros possíveis danos decorrentes da carga de processo de tubulações de forno de coqueamento retardado. O forno em questão é do tipo double fired, com serpentina passando pela região central do tubo sendo aquecida por fileiras de igual número de queimadores, localizados a esquerda e a direita dos tubos, com a intenção de uniformizar a temperatura. A Tabela 1 consta as principais informações do forno e as condições de operação.

Material	Espessura Nominal (mm)	Pressão (kgf/cm <sup>2</sup> )	Temperatura de Operação (°C)	Temperatura Máxima (°C)
AISI 321L 'estabilizado'	11	103,50	420 - 670	695

Tabela 1. Características do forno e condições de operação.

Fonte: Autoria Própria (2020).

Antes da retirada do tubo para ensaio, foi realizada medição de espessura por ultrassom com aparelho DM5E para conferir a espessura de projeto. Também foi realizada análise de liga instantânea por meio Espectrometria de raio X, com equipamento Niton x13t para confirmar a composição química do material.

Para retirado das amostras foi retirado um trecho próximo aos queimadores e que, portanto, está sujeito a temperaturas mais elevadas. Foi realizado corte com oxicorte um trecho de 250 mm de comprimento de tubo de 4" de diâmetro da serpentina do forno tipo cabine para posterior remoção de amostras. O trecho removido, conforme visualizado na Figura 1, foi seccionado em 4 seções equidistantes a 90° uma da outra a fim de se obter maior representatividade espacial do tubo dentro do forno, através de uma máquina de corte do tipo "Cut-Off". Ou seja, ao total foram retiradas 4 amostras para análise.



Figura 1. Trecho do tubo onde foram retiradas as amostras.

Fonte: Autoria Própria (2020).

Posterior a retirada das amostras foi iniciado o processo de preparação metalográfica. As 4 amostras foram embutidas em resina baquelítica e, sendo, logo em seguida, preparadas na lixadeira automatizada pelos sistemas abrasivos do tipo MD – Plano 220 com refrigeração em água. Para finalizar a preparação metalográfica foi realizado o processo de polimento das amostras utilizando pasta de diamante 3  $\mu$ m.

Finalizado o processo de preparação metalográfico foi iniciado o processo de ataque químico das amostras. Para o estudo em questão foi realizado um ataque químico e outro ataque eletroquímico a fim de obter os resultados esperados, sendo o ataque químico realizado com o Reagente de Murakami e o ataque eletroquímico utilizando o ácido oxálico. O ataque com reagente de Murakami foi realizado numa temperatura de 86 °C por 180 s, conforme proposto pela norma ASTM (American Society for Testing and Materials), norma E-407-70. Esta solução permite fazer a distinção entre ferrita delta, carbonetos e fase sigma. Já no ataque eletroquímico foi utilizado o reagente ácido oxálico com 10% de concentração e empregando uma tensão de 6eV por 60s, conforme a ASTM, norma A 262. Este ataque permite identificar o grau de precipitação de carbonetos de cromo nos contornos de grãos, mecanismo que fragiliza a resistência a corrosão dos aços inoxidável e possibilita, dessa forma, a sensibilização dos aços inoxidável, principalmente, da série 300.

Com as amostras atacadas foi dado início ao processo de microscopia ótica onde foi utilizado o microscópio ótico da marca Olympus GX51 para visualização das microestruturas, com e sem ataque químico. Na última etapa foi realizado o ensaio de dureza abrangendo centro e a superfície, conforme a norma de referência ABNT NBR ISO 6506-1. Para o ensaio foi utilizado o equipamento durômetro de bancada Wolpert na escala BRINNEL Hardness HB Ø 2,5 / 187,5 kgf/cm².

### 3 | RESULTADOS

Serão apresentados e discutidos nesta seção os resultados obtidos ao longo do estudo sobre os processos de degradação de tubulação de aço inoxidáveis AISI 321 L exposta a condições de alta temperatura e ambiente altamente corrosivo de forno de caldeiras.

#### 3.1 Quantificação da composição química e espessura do tubo

Para espessura foi encontrado um valor de 11,11 mm e, para este trecho está dentro do limite permitido. A composição química do material, conforme Tabela 2, está de acordo com a composição química do material comparado ao fornecido pelo fabricante e, desta forma, assegurando que realmente foi produzido do aço inoxidável AISI (American Iron and Steel Institute) 321L. De posse dessas informações, o trecho de tubo seguiu em parte para análise metalográfica através de técnicas de microscopia.

Cr	Ni	Ti	Mn	Nb	Mo	Fe
17,17	11,41	0,372	2,19	0,024	0,337	bal

Tabela 2. Análise de composição química (%) do trecho do tubo.

Fonte: Autoria Própria (2020).

## 3.2 Análise dos mecanismos de degradação do tubo

O forno trabalha com temperatura de superfície dos tubos entre 420°C a 695°C, com uma pressão interna de 25 Kgf/cm<sup>2</sup> na entrada do equipamento (Tabela 1). Este forno tem a função de gerar matéria prima para a produção de produtos de melhor valor agregado, tais como: diesel, gasolina, GLP (Gás Liquefeito de Petróleo) entre outros. É previsto que mesmo operando em condições normais aconteça a obstrução da serpentina do forno. Quando isso ocorre, a temperatura da superfície da serpentina aumenta de acordo com o grau de obstrução do tubo, fato que leva a ocorrer deficiências de troca térmica, elevando a carga térmica dos queimadores causando o superaquecimento do sistema. Os superaquecimentos provocam a degradação mais rápido dos materiais, pois, os mesmos ficam expostos a temperatura que ultrapassam o limite permitido de utilização para esses materiais.

Os tubos são expostos ao calor radiante da chama de queimadores pelo lado externo, e com carga de RAT (Resíduo Atmosférico) na parte interna, oriundo de processo anterior de destilação. O RAT pode conter contaminantes do petróleo cru, como enxofre, ácidos naftênicos e outros. Esses contaminantes podem ativar mecanismos de danos nos tubos, segundo o API 571.

As partes interna, externa e meio revelaram características distintas entre si, tendo em vista possuírem condições de trabalho diferentes como mencionado anteriormente. A parte interna do tubo possui contato direto com carga extremamente rica em carbono, já a parte externa possui contato com gases de combustão da própria câmara do forno, que por haver desajustes no processo passou um tempo operando com mistura rica em compostos de enxofre que se enquadram, neste caso, como contaminantes e que podem causar danos aos tubos. Desta forma, a análise da tubulação foi dividida em seção de análise descritas a seguir.

### 3.2.1 Análise da zona interna do tubo

Na região interna do trecho de do tubo, apesar do tubo ser estabilizado ao titânio, percebe-se que o material sofre corrosão intergranular advindo do processo de sensitização que sofre. Fato que é agravado pelo tipo de carga presente no processo possuir bastante carbono. Com isso, alguns contornos de grão já apresentaram algumas regiões com estrutura ditch, conforme pode ser observado na Figura 2.

Fica evidente que a precipitação ocorreu devido a exposição a altas temperaturas por longo tempo e também ao enriquecimento do carbono na superfície do material presente na carga de RAT, causado pelo fenômeno de difusão. Observando a região mais interior da peça, nota-se que a difusão de carbono possivelmente foi menor, o que deixa a região ainda estabilizada. Em outras palavras, na região da superfície interna, o titânio presente no aço inoxidável AISI 321 L manteve todo o carbono da matriz em forma de carbeto de titânio (estabilização).

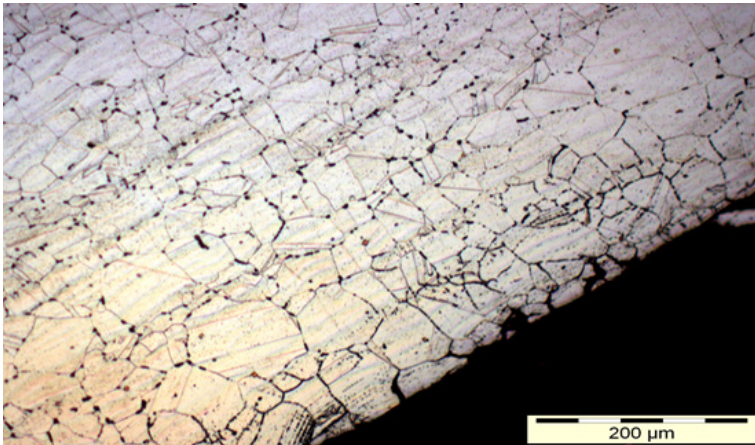


Figura 2. Micrografia da zona interna da tubulação.

Fonte: Autoria Própria (2020).

Todo o carbono presente no fluido de processo que vier a difundir-se no material após a fabricação do tubo estabilizado, acabará reagindo com o cromo presente, valendo-se da ressalva que agora existe uma matriz enriquecida de carbono superficialmente, e neste caso vai permitir a precipitação do carboneto de cromo ao longo do contorno de grão. Isso explica o fato de o material apresentar uma corrosão intergranular mais agressiva na superfície do material, em torno de  $250\ \mu\text{m}$ , além de mostrar um episódio em que o 321L não é imune a sensitização.

### 3.2.2 *Análise da zona externa do tubo*

A parte externa do tubo é o lado que tem contato com os gases de combustão da câmara e que está exposto a chama dos queimadores. Quanto menor o grau de contaminantes presentes nos gases de combustão e temperatura, menor será a agressão que o tubo poderá sofrer.

A Figura 3 mostra com mais detalhe a região do material pelo lado externo onde é possível verificar penetração de óxido de até  $30\ \mu\text{m}$ , representada pela região azul claro e indicada por traço amarelo e as trincas pelas setas de cor preta. Toda a parte branca da imagem se refere ao metal. Por mais que o tubo seja inoxidável, foi encontrado uma camada de  $30,6\ \mu\text{m}$  de oxidação (Figura 3). Além disso também foi possível verificar a existência de trincas avançando na região externa do material. O fato de o gás de combustão do forno deste exemplo ter operado com um grau de  $\text{H}_2\text{S}$  acima da tolerância, está contribuindo para a propagação de trincas pelo mecanismo de sulfetação.



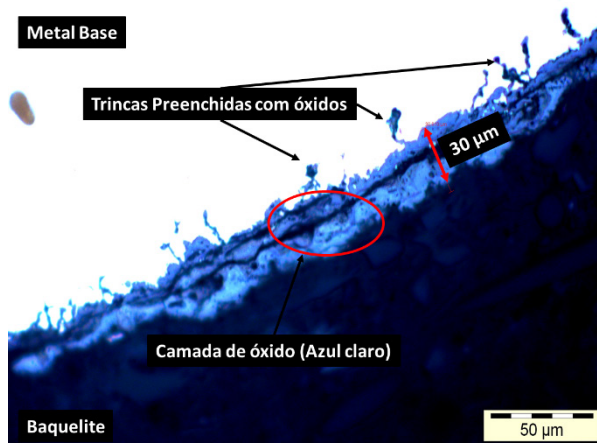


Figura 3. Micrografia da região externa da tubulação.

Fonte: Autoria Própria (2020).

Uma outra preocupação nessa região é a possibilidade dos tubos serem submetidos a temperatura máxima prevista acima do estabelecido em projeto, fato que pode acelerar a taxa de fluência. Uma incidência de chamas dos queimadores dos tubos pode vir a ocasionar esse problema, principalmente em caso de queimadores obstruídos ou desalinhados, ou mesmo por um descontrole operacional, causando um superaquecimento localizado (Short Term Overheating) e aceleração de deformações no tubo em decorrência. Lembrando, como foi mencionado anteriormente, a obstrução no interior das tubulações pelo tempo de operação leva a dificuldade de trocas térmicas e, assim, causando o superaquecimento que pode levar a rompimento dos tubos, se isso não for observado.

### 3.2.3 Análise da seção transversal do tubo

Na análise da seção transversal do tubo foi possível perceber a existência de fase sigma na região em questão, representada pelas indicações de regiões de cor vermelho-laranja indicados na Figura 4. Isso aconteceu, provavelmente, devido no processo a temperatura atingir valores próximos ao aparecimento da fase sigma em condições normais de operação. Portanto, pode ocorrer transformação da ferrita delta em fase sigma durante o tempo de operação do material nas condições citadas (Tabela 1) e ao caso de superaquecimentos.

Verificado a alteração de temperatura durante o tempo de operação do forno verificou-se que o limite de operação (695 °C) é ultrapassado diversas vezes. Esta informação assegura que o material está exposto facilmente a condições que permitem o surgimento da fase sigma, além de acelerar o processo de fluência do material.



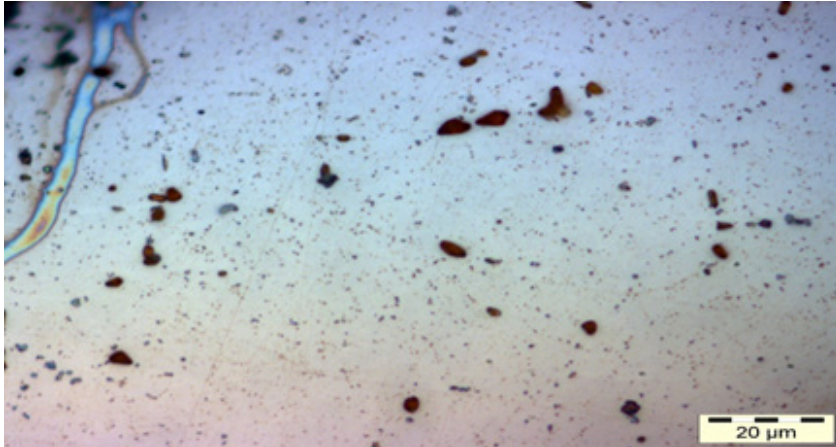


Figura 4. Micrografia da seção transversal da tubulação.

Fonte: Autoria Própria (2020).

### 3.3 Ensaio de dureza

Na realização do ensaio de dureza foi utilizado uma carga de  $187,5 \text{ kgf/cm}^2$  com durômetro de bancada Wolpert. Segundo ASME II, a dureza do material A-213 TP 321 é de 192 HBW (90 HRB). Conforme pode ser visto na tabela 4, os valores encontrados estão um pouco abaixo dos valores convencionados para o material. Mesmo assim, está redução no momento não é significativa, apesar de haver mecanismos de danos ativos. Portanto, os resultados de dureza obtidos não apresentaram desvios significativos que pudessem gerar preocupações ou observações adicionais.

Região	Medida (HBW)	Desvio Padrão
Superfície 1	168	2,8
Centro 1	153	2,5
Superfície 2	160	1,41
Centro 2	152	6,12
Superfície 3	153	3,77
Centro 3	153	2,5
Superfície 4	166	3,74
Centro 4	154	1,41

Tabela 3. Valores de dureza para cada região.

Fonte: Autoria Própria (2020).

## 4 | CONCLUSÃO

Através dos resultados colhidos é possível concluir que tubo do aço inoxidável 321 L possui dois mecanismos de danos ativados, simultaneamente, um pelo lado interno e outro pelo lado externo do tubo. Embora o tempo para acontecer os mecanismos tenham sido de apenas três anos e seis meses, ambos os danos nos lados do tubo ainda possuem baixo grau de penetração no material. Fato que pode ser corrigido com medidas mitigadoras ou com um melhor modo de operação do forno, reduzindo-se o teor de compostos de enxofre nos gases de combustão, por exemplo. Não foi constatado início de fluência pelo tipo de microscopia ótica utilizada, mas é importante manter a temperatura dentro dos limites para que haja aceleração deste tipo de dano.

Existe um processo de oxidação e/ou sulfetação ocorrendo, simultaneamente, pelo lado externo, sendo encontrado camada externa de óxidos de até 30  $\mu\text{m}$  junto com trincas, levando o material a reduzir sua vida útil, caso continue com esse mecanismo ativo. Neste caso, reduções do nível de contaminantes relacionados ao enxofre presente nos gases poderiam reduzir o mecanismo da superfície externa dos tubos. De fato, o mecanismo externo, se não for interrompido, poderá avançar na microestrutura do material, o que deve ser evitado.

Pelo lado interno, já houve início de trincas devido ao processo de difusão do carbono, atingindo os primeiros 250  $\mu\text{m}$  de profundidade, causando trincas intergranulares de até 39 microns. Esse dano não pode ser eliminado, apenas monitorado, já que o carbono difundido no material é inerente a carga de operação do equipamento, restando apenas a opção de controlar a temperatura para reduzir o processo de difusão. Por se tratar de corrosão intergranular, não é possível atribuir vida remanescente ao tubo, já que a corrosão não é uniforme. Com relação ao grau de sensitização, já foram encontrados alguns grãos com estrutura ditch na superfície interna do material. Isso indica que o material 321 L estabilizado não é imune a sensitização, principalmente, em um meio que contém carga com elevado teor de carbono.

É importante reiterar que até o momento desta análise, não foram identificados desvios significativos nos valores de durezas que indiquem alguma observação ou preocupação. Por fim, o estudo dos materiais por meio da técnica de metalografia que existe mecanismos ativos que estão reduzindo a vida útil dos tubos. Diante dos resultados, é importante a definição de um escopo, planejamento e programação de intervenções para paradas futuras desses equipamentos. Além de tomar medidas mitigadoras para redução da degradação desses materiais.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API 571 – *Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry*, 1ª Edição, Dezembro, 2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **A-262 - Standard Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels**. West Conshohocken, PA, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E-407-70 - Standard Practice for Microetching Metals and Alloys**. West Conshohocken, PA, 2015.

ASKELAND, D. R.; WRIGHT, W. J. **Ciência e engenharia dos materiais**. Cengage Learning, 3ª ed., 672 p., 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6506-1 - Materiais Metálicos – Ensaio de dureza Brinell Parte 1: Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1ª edição, 2019.

COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. Blucher, São Paulo, 4ª ed., 521-546 p., 2008.

FARIA, G. L.; GODEFROID, L. B.; FARIA, G. A.; CUNHA, E. C.; **Avaliação da Susceptibilidade à Corrosão Intergranular em Aços Inoxidáveis Aplicados em Chapas Expandidas**. 22º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Natal, Brasil, pp. 304-037, 2016.

GONÇALVES, J.C. **Estudo de corrosão em sistemas de topo de unidades de destilação de petróleo – avaliação em laboratório de inibidor de corrosão comercial e agentes neutralizantes**. Dissertação de Mestrado em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais - Universidade federal do Rio de Janeiro, 2007.

GUIMARÃES, E.M. **Causas e formas de corrosão na unidade de recuperação de enxofre da refinaria Gabriel passos (REGAP/Petrobras)**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química - Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.

LUCCHESI, A.L. **Estudo da corrosão naftênica em planta de destilação atmosférica de petróleo. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Materiais** – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

PELLICCIONE, A. S.; Moraes, M. F.; Galvão, J. L. R.; Mello, L. A.; Da Silva, É. S. **Análise de falhas em equipamentos de processo**. Interciência, Rio de Janeiro, 416 p., 2012.

TELLES, P.C.S. **Materiais para equipamentos de Processo**. Interciência, Rio de Janeiro, 6ª ed., 276 p., 2003.

VIOTO, R.P.; ANTUNES, R. A. **Estudo do Fenômeno de Sensitização do Aço Inoxidável Austenítico Estabilizado AISI 347**. 22º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Natal, Brasil, pp. 306-013, 2016.

## FABRICAÇÃO DA LIGA DE ALUMÍNIO AA7013 ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE METALURGIA DO PÓ

Data de aceite: 01/06/2021

Data de submissão: 07/03/2021

### Enéas Carlos de Oliveira Silva

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE  
Recife – PE  
<http://lattes.cnpq.br/5968682154600734>

### Eduardo José Silva

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE  
Recife – PE  
<http://lattes.cnpq.br/3546466947253424>

### Thiago Batista David

Centro Universitário Estácio do Recife  
Recife – PE  
<http://lattes.cnpq.br/2742652536623661>

### Moisés Euclides da Silva Junior

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE  
Recife – PE  
<http://lattes.cnpq.br/9524894169629954>

### Oscar Olimpio de Araujo Filho

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE  
Recife – PE  
<http://lattes.cnpq.br/6740759499723367>

**RESUMO:** Entre as diversas ligas de alumínio, destacam-se as da série 7XXX, aplicadas principalmente em componentes estruturais de aeronaves, pois apresentam níveis mais elevados de resistência e dureza. Assim este trabalho consistiu na fabricação e caracterização da liga de alumínio AA7013, fabricada via metalurgia do pó. Os pós foram processados através da

moagem de alta energia (MAE) durante 0,5, 1,0 e 2,0 horas e em seguida caracterizados por microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de energia dispersiva (EDS), difração de raios-X (DRX) e por fim granulometria por Difração a Laser. Após a caracterização dos pós, eles foram consolidados através de compactação uniaxial a frio, seguida de uma sinterização por fase sólida. Por fim, foi realizada a caracterização microestrutural do sinterizado através de MO e MEV, a composição química do material foi analisada através da técnica de EDS, e em seguida o material foi submetido ao ensaio de microdureza vickers, possibilitando o estudo da propriedade de dureza obtida nos corpos de prova. A liga de Al AA7013 processada por MAE durante 2h apresentou um ganho de 353,68% de dureza na seção superficial e 339,58% na seção transversal, quando comparado com o material consolidado da liga de Al AA1100 sem moagem.

**PALAVRAS-CHAVE:** Metalurgia do pó, moagem de alta energia, liga aa7013.

### MANUFACTURING ALUMINUM ALLOY AA7013 THROUGH OF POWDER METALLURGY TECHNIQUES

**ABSTRACT:** Among the various aluminum alloys, those of the 7XXX series stand out, mainly applied to structural components of aircraft, as they have higher levels of strength and hardness. So this work consisted in the manufacture and characterization of the aluminum alloy AA7013, manufactured via powder metallurgy. The powders were processed through high energy grinding (MAE) for 0.5, 1.0 and 2.0 hours and then characterized by scanning electron

microscopy (SEM), dispersive energy spectroscopy (EDS), ray diffraction -X (DRX) and finally Laser Diffraction granulometry. After the characterization of the powders, they were consolidated through cold uniaxial compaction, followed by sintering by solid phase. Finally, the microstructural characterization of the sinter was carried out using OM and SEM, the chemical composition of the material was analyzed using the EDS technique, and then the material was subjected to the vickers microhardness test, enabling the study of the obtained hardness property in the specimens. The Al AA7013 alloy processed by MAE for 2h showed a gain of 353.68% of hardness in the surface section and 339.58% in the cross section, when compared with the consolidated material of the Al AA1100 alloy without grinding.

**KEYWORDS:** Powder metallurgy, mechanical alloying, aa7013 alloy.

## 1 | INTRODUÇÃO

O aumento no consumo de alumínio é a prova de que este metal significa na indústria moderna. O alumínio segue o ferro/aço entre os metais de maior consumo anual, sendo o mais importante dos metais não ferrosos. Dentre as características físico-químicas, destaca-se o seu baixo peso específico, comparado com outros metais de grande consumo, resistência à corrosão e alta condutibilidade elétrica/térmica (ABAL, 2007).

Um dos motivos que torna o alumínio tão atrativo, é o fato de poder combinar-se com a maioria dos metais de engenharia, formando ligas a partir destas combinações para obtenção de características tecnológicas. Dentre essas, destacam-se as ligas da série 7XXX (Al, Zn). Ligas em que o zinco (Zn) é o principal elemento de liga, mas outros elementos de liga são adicionados, como cobre (Cu) e o magnésio (Mg), é utilizada principalmente em todos os segmentos da indústria aeronáutica (fuselagem de aeronaves, motores, etc), pois oferece uma maior resistência à corrosão e maior resistência mecânica.

O alumínio e suas ligas atualmente são processados por técnicas de metalurgia com aplicações no setor industrial em grande escala (BARBOSA, 2014; CHIAVERINI, 2001). A metalurgia do pó é um processo de fabricação que consiste na manufatura de peças a partir da combinação e consolidação de pós metálicos. Este método é bastante competitivo, principalmente em comparação aos processos convencionais de fabricação metalúrgica, possuindo um baixo custo tecnológico e econômico, utiliza o aproveitamento máximo de matéria-prima (acima de 95%) e obtenção de peças em grandes quantidades com formas complexas, obtenção de economia de custos e qualidade do produto final.

O processo de Moagem de Alta Energia (MAE), é uma técnica de processamento do pó totalmente em estado sólido que envolve soldagem, fraturas e ressoldas, permite a produção de materiais homogêneos através da mistura de pós elementares em um moinho de bolas de alta energia. O tamanho das partículas em moagem de alta energia é variável, entre 1 e 200  $\mu\text{m}$ . Este tamanho diminui exponencialmente com tempo de moagem (SURYANARAYANA, 2001).

A MAE começa com a mistura na proporção adequada dos pós de partida, em seguida a mistura é carregada em um recipiente (jarra) de moagem e nela é adicionada

esferas de aço (corpos de moagem) (SURYANARAYANA, 2001). No decorrer do sistema de MAE, os movimentos das esferas gerarão colisões em alta velocidade entre elas e os pós, formando, assim, compactos de pós. À medida que o tempo de moagem aumenta, há o aumento desses compactos, ou seja, a soldagem das partículas dos pós. Simultaneamente a soldagem, e devido à repetição dos impactos, ocorre deformação plástica nos compactos, com o passar do tempo esses se tornam encruados, dessa forma, são levados ao fenômeno de fratura frágil ou falha por fadiga (Zhang, 2004).

A Compactação dos pós é responsável pela definição da forma desejada (geometria) e densificação da mistura. A compactação é feita colocando-se o pó em cavidades de matrizes montadas em prensas de compressão, particularmente fabricadas para a técnica de metalurgia do pó, da qual é comprimido à determinadas pressões de acordo com o tipo de pó que seja utilizado e com características finais desejadas nas peças sinterizadas (CHIAVERINI, 1986).

O presente trabalho consiste em fabricar ligas de alumínio AA7013, utilizando o processo de fabricação por metalurgia do pó. Os pós foram misturados e homogeneizados através de técnicas de moagem de alta energia, submetidos a uma compactação uniaxial, obtendo forma e dimensionamento (compactado verde), e por fim a consolidação final, através da sinterização por fase sólida (sob condições controladas de temperatura), consolidando o material, promovendo assim, uma maior rigidez, dureza e resistência mecânica dos materiais processados.

## 2 | METODOLOGIA

Este capítulo tem o objetivo de descrever de forma clara e sucinta todos os materiais e procedimentos utilizados na fabricação da liga de alumínio AA7013. Inicialmente foi selecionada a composição das ligas a serem fabricadas de acordo com o *ASM Handbook* (1992), de posse dos percentuais referentes a cada elemento das ligas, os pós elementares foram separados e em seguida pesados em uma balança analítica. Posteriormente esses pós foram submetidos a moagem de alta energia (MAE) através de um moinho de bolas vibratório do tipo SPEX, durante 0,5, 1,0 e 2,0 horas.

A caracterização microestrutural e química do material particulado foi realizada através das técnicas de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS), o estudo e identificação das fases geradas após a MAE foi realizado através de difração de RX.

Os pós processados por MAE e o pó da liga de alumínio puro AA1100 foram consolidados através de compactação uniaxial a frio e sinterização por fase sólida.

Para tal estudo foram fabricados três corpos de prova sinterizados para cada um dos tempo de moagem e mais 3 corpos de prova sinterizados da liga de alumínio AA1100 sem moagem, totalizando assim, 12 corpos de prova, em seguida os corpos de prova foram

submetidos ao processo de preparação metalográfica (corte, embutimento, lixamento, polimento e ataque químico). A caracterização microestrutural e química do material consolidado, foi realizada através das técnicas de microscopia ótica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV) associada a espectroscopia de energia dispersiva (EDS). Finalizando o processo de caracterização do material consolidado, os corpos de prova sinterizados foram submetidos a um ensaio de microdureza *Vickers*, determinando assim a propriedade de dureza do material estudado.

### 2.1 Pesagem dos pós

As massas dos pós elementares foram pesadas utilizando-se uma balança analítica com precisão de 4 casas decimais, da marca SHIMADZU, modelo ATI224.

A Tabela 1 mostra a quantidade de massa (g) utilizada na moagem de alta energia para a fabricação das ligas de alumínio. A massa total calculada para processamento dos pós foi 12g + ácido esteárico (2% da massa total), totalizando 12,24g (pó).

Amostra	Tempo de Moagem	Al Puro (g)	Si (g)	Fe (g)	Cu (g)	Mn (g)	Zn (g)	Ti (g)	ACP (g)	Massa da Esfera (g)
AA7013	0,5h	11,6523	0,0723	0,0843	0,0122	0,1816	0,2410	-	0,2412	120
	1,0h	11,6523	0,0723	0,0843	0,0122	0,1816	0,2410	-	0,2412	120
	2,0h	11,6523	0,0723	0,0843	0,0122	0,1816	0,2410	-	0,2412	120

Tabela 1. Composição química das ligas de alumínio AA 7013.

Fonte: Adaptado de ASM HandBook (1992).

### 2.2 Processamento dos pós (MAE)

Para o processamento dos pós, utilizou-se um moinho vibratório de alta energia do tipo SPEX Figura 1, equipamento este, comumente empregado no processamento de amostras em laboratório. material foi processado durante períodos de 0,5, 1,0 e 2,0 horas, a uma velocidade de rotação de 720 rpm.

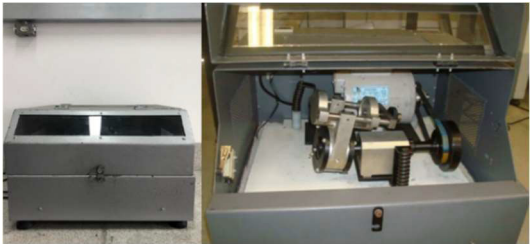


Figura 1. Moinho de bolas vibratório (SPEX).

Fonte: Silva Junior (2020).

Os pós foram colocados na jarra (recipiente de moagem) fabricada em aço inox 304L e como corpo de moagem foi utilizado esferas metálicas. A relação de massa de esfera/massa de pó foi de 10:1, ou seja, para cada 120g de esferas foram utilizadas 12g de massa dos pós.

### 2.3 Compactação e sinterização

Os pós processados foram submetidos a uma compactação uniaxial a frio, em numa prensa hidráulica. O tempo de aplicação da carga foi de 10 minutos a uma pressão de 40 ton. O produto resultante da compactação por apresentar alguma consistência e resistência mecânica limitada, é denominado de “compactado verde”. O material compactado ganhou forma e dimensionamento específico, obtendo diâmetro de 17,00mm e espessura de 9,15mm, conforme ilustrado na figura 2.

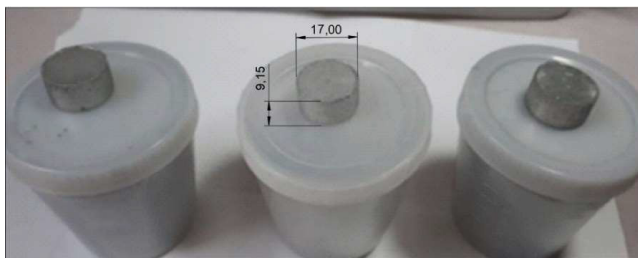


Figura 2. Amostras de compactado verde.

Fonte: Autor (2018).

Logo após a compactação, as amostras (compactado verde) foram sinterizadas num forno tipo Mufla, as amostras foram sinterizadas durante 5h a uma temperatura de 500 °C, com um taxa de aquecimento de 20 °C/min. Com o término do aquecimento o forno foi desligado e a temperatura resfriada calmamente dentro do forno até permanecer na temperatura ambiente com uma taxa de resfriamento foi de 0,459 °C/min.

### 2.4 Preparação metalográfica

Para a análise no microscópio ótico, foram utilizadas as amostras sinterizadas. Elas foram cortadas (particionadas) em uma “*cut-off*”, foi usado uma máquina de policorte, da marca Arotec, modelo COR 80, sendo usado como meio cortante um disco de corte abrasivo (óxido de silicato). O principal objetivo do corte foi obter para estudo as secções superficiais e transversais. Logo após processo de corte dos materiais, as amostras foram submetidas ao processo de embutimento a quente.

Com as amostras embutidas, a etapa subsequente é a de lixamento. A técnica utilizada para o lixamento foi a manual, que consiste em lixar a amostra sucessivamente



com lixa de granulometria cada vez menor. Para este trabalho foram utilizadas as lixas metalográficas com granulometrias de: 180#, 240#, 320#, 600#, 800#, 1000# e 1200#.

Após o lixamento, a próxima etapa é a do polimento, que tem como principal função eliminar os riscos e marcas da superfície. Para o polimento das amostras foi utilizada uma pasta de diamante de 3  $\mu\text{m}$  e 1  $\mu\text{m}$ , dando um melhor acabamento para a amostra, pano de polimento adequado. A politriz usada no polimento é da marca Arotec, modelo Aropol 2V.

Por fim, com o intuito de revelar os contrastes das fases, as amostras foram submetidas ao ataque químico, através de uma solução aquosa de ácido fluorídrico a 0,5% durante um tempo de 15 segundos, através do método de esfregaço, posteriormente as amostras foram lavadas com água corrente, etanol e em seguida secadas por um jato de ar quente paralelamente a superfície atacada.

## **2.5 Caracterização do material consolidado**

Os corpos de prova dos materiais consolidados foram submetidos a caracterização microestrutural, através das técnicas de microscopia ótica (MO), e microscopia eletrônica de varredura (MEV), a análise de composição química pontual foi realizada através do sensor de EDS acoplado ao MEV utilizado. Por fim as amostras foram submetidas ao ensaio de microdureza Vickers.

## **3 | RESULTADOS**

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos através do presente trabalho.

### **3.1 Caracterização do material particulado**

A Figura 3 representa o espectro de raios – X para o Al AA 1100. No difratograma, o alumínio apresenta estrutura CFC, conforme a literatura este tipo de estrutura deve ter os valores dos índices de Miller (h, k e l) todos números pares ou ímpares (CALLISTER, 2012).

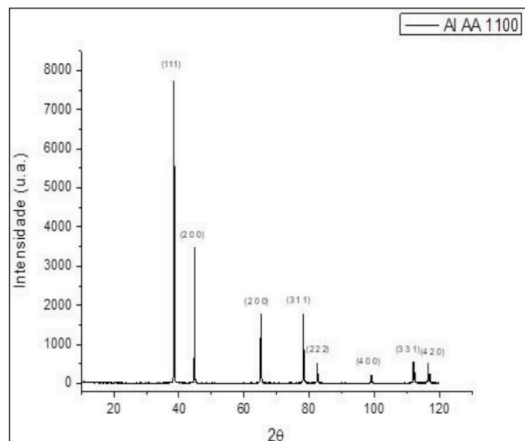


Figura 3. Espectro de DRX para o Al AA 1100.

Fonte: Autor (2018).

Na Figura 4 são apresentados os difratogramas das amostras de pós da liga de alumínio AA 7013, processadas durante 0,5, 1,0 e 2,0 horas através de moagem de alta energia. Observa-se que não houve alterações significativas nos difratogramas para os diferentes tempos de moagem. Observa-se uma variação de intensidade dos picos com relação à liga processada durante 2,0h, apesar da mudança na intensidade dos picos, os valores de ângulos de difração ( $2\theta$ ) da matriz em alumínio (AA 1100) são os mesmos. Eventualmente outras fases dos elementos de ligas adicionados ao AA 1100 não foram identificados, pois ficou abaixo da resolução do equipamento, inferior a 5%.

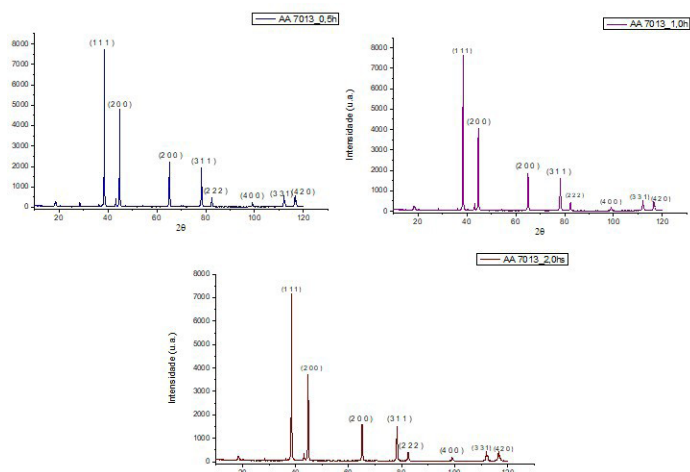


Figura 4. Espectros de DRX para a liga AA 7013 processada por 0,5h, 1,0h e 2,0h.

Fonte: Autor (2018)

A Figura 5 (a, b) apresenta as imagens de MEV do pó de Al AA 1100 (alumínio comercialmente puro), como recebido, utilizado neste trabalho.

A Figura 5 destaca a morfologia original, predominantemente esférica (grãos equiaxiais) do Al AA 1100 recebido para pesquisa obtidas por Silva (2017), sem reforço e sem sofrer o processo de moagem de alta energia (MAE). Essa morfologia é típica de material dúctil e de pó fabricado pelo método de atomização a ar, que promove a solidificação do metal em partículas finamente divididas. A Figura 6 (a,b) foram obtidas por Silva (2017) e apresenta a região analisada e o espectro de EDS do pó de Al AA 1100. A análise de EDS do AA 1100 demonstra apenas o espectro de Al na composição. É importante ressaltar que não foi identificada a presença de contaminação neste pó.

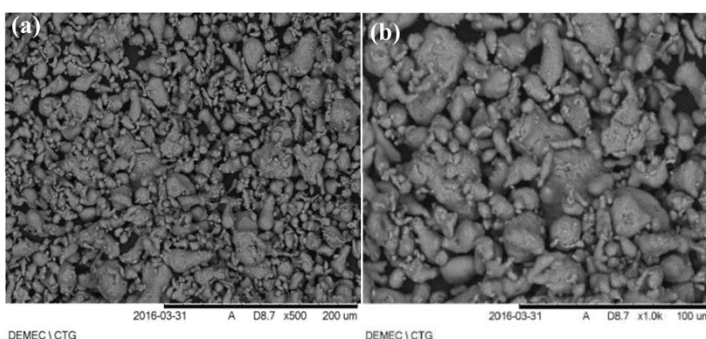


Figura 5. Imagem de MEV – Al AA 1100. (a) aumento de 500x; (b) aumento de 1000x.

Fonte: Silva (2017).

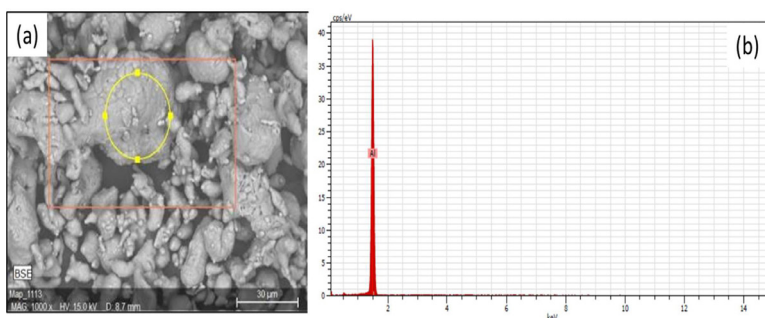


Figura 6. EDS do Al AA 1100. (a) Região analisada; (b) Espectro de EDS.

Fonte: Silva (2017).

As Figuras 7 a 9 apresentam as imagens de MEV para a liga processada AA 7013 durante o tempo de 0,5h, 1,0h e 2,0h. Para a liga de alumínio AA 7013 processada durante 0,5h no moinho de alta energia, apresenta uma morfologia irregular e achatada, Figuras 7 (a,

b). As Figuras 8 (a, b) processada durante 1,0h observa-se uma morfologia mais uniforme. A mostra processada pelo tempo de moagem de 2,0h ficou evidente que as partículas de pós ficam mais finas, deformadas com uma morfologia refinada, Figura 9 (a, b).

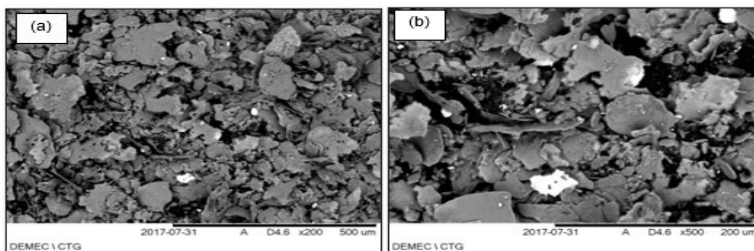


Figura 7. Imagem de MEV da liga AA 7013\_0,5h. (a) Aumento de 200x; (a) aumento de 500x.  
Fonte: Autor (2018)

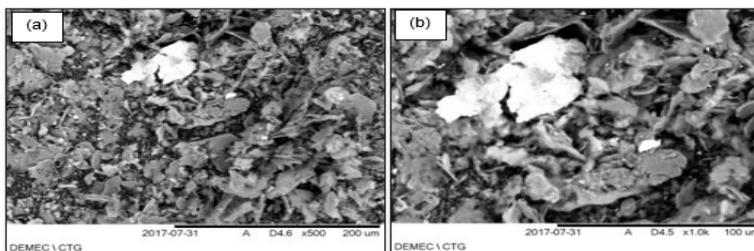


Figura 8. Imagem de MEV da liga AA 7013\_1,0h. (a) Aumento de 200x; (a) aumento de 500x.  
Fonte: Autor (2018).

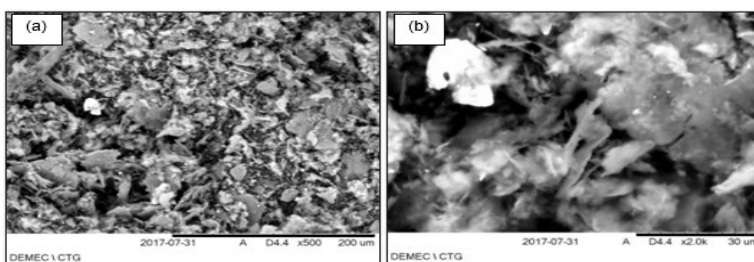


Figura 9. Imagem de MEV da liga AA 7013\_2,0h. (a) Aumento de 200x; (a) aumento de 500x.  
Fonte: Autor (2018).

As figuras 10 a 12 apresentam os EDS das amostras de pós processados em 0,5h, 1,0h e 2,0h por moagem de alta energia.

A análise por EDS, na Figura 10, da liga de alumínio AA 7013 processada em moinho de alta energia durante 0,5h, mostra os elementos que compõem esta liga, há o Al, Ni, Cr, Zn, Mn, Ti, Si e O. A Figura 11, processada durante 1,0h mostra elementos de Al, Zn, Fe, Mn e O; e para o tempo de 2,0h, Figura 12, há presença dos elementos Al, Zn, Cu, Ni, Fe e O.

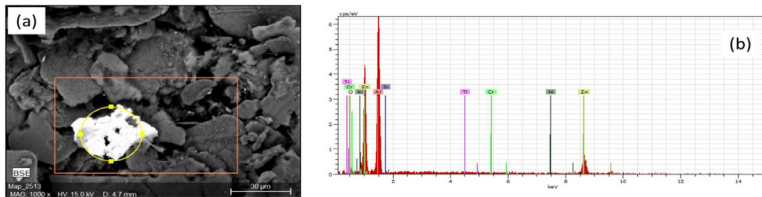


Figura 10. EDS do pó de AA 7013\_0,5h. (a) Região analisada; b) Espectro de EDS.

Fonte: Autor (2018).

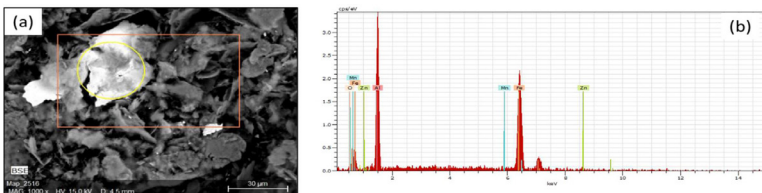


Figura 11. EDS do pó de AA 7013\_1,0h. (a) Região analisada; b) Espectro de EDS.

Fonte: Autor (2018).

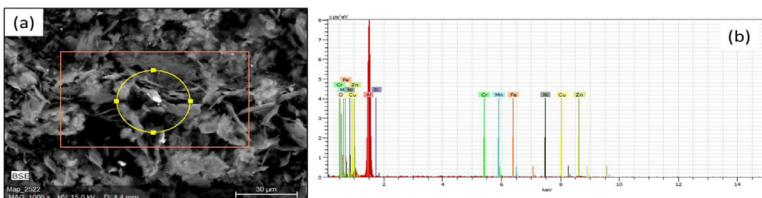


Figura 12. EDS do pó de AA 7013\_2,0h. (a) Região analisada; b) Espectro de EDS.

Fonte: Autor (2018).

### 3.2 Caracterização do material consolidado

Foram submetidas a caracterização via Microscopia Ótica a amostra sinterizadas de Al AA 1100 e amostras sinterizadas dos pós processados por MAE da liga AA 7013.

As Figuras 13 (a, b) apresentam a amostra de Al AA 1100 sinterizada. A imagem de MO do Al AA 1100 apresenta boa homogeneidade e densificação.

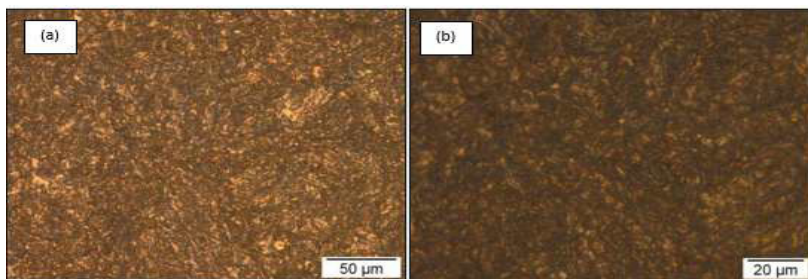


Figura 13. Imagens de MO da liga AA 1100 – seção superficial: (a) 500x; (b) 1000x.

Fonte: Autor (2018)

As Figuras 14 a 16 (a, b, c, d) apresentam a amostra da liga AA 7013 (seções superficial e transversal), sinterizada e processada por moagem de alta energia durante o tempo de 0,5h, 1,0h e 2,0h com ataque HF 0,5% durante 40s. Os resultados da microscopia ótica nas amostras das ligas de Alumínio AA 7013 das seções superficiais e transversais com tempo de processamento no MAE de 0,5h, 1,0h e 2,0h com duas ampliações de 500x e 1000x. É possível observar grãos irregular e contornos de grãos bem evidenciados e definidos. Com o aumento do tempo de moagem houve um aumento no que concerne às deformações das lamelas. As imagens de MO também mostram uma boa densificação da liga, contudo nota-se a presença de poros (indicados abaixo).

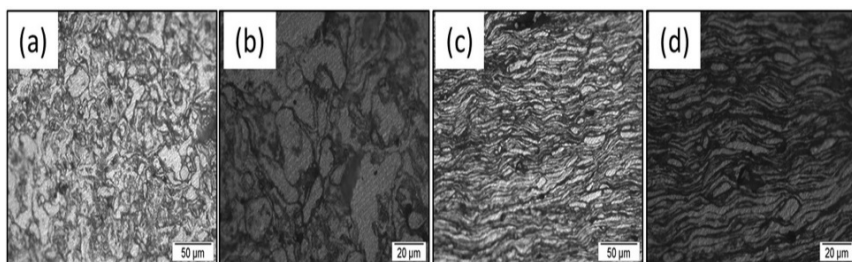


Figura 14. Imagens de MO da liga AA 7013\_0,5h – seção superficial: (a) 500x; (b) 1000x; - seção transversal: (c) 500x; (d) 1000x.

Fonte: Autor (2018).



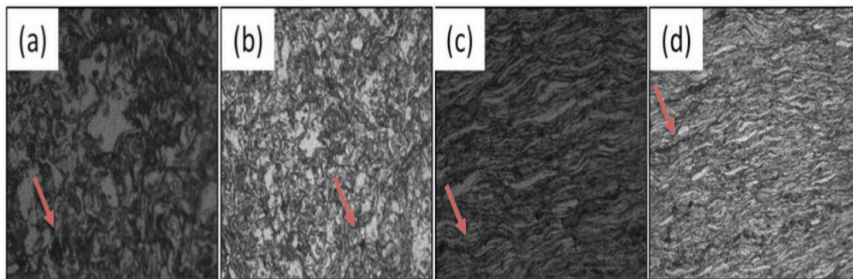


Figura 15. Imagens de MO da liga AA 7013\_1,0h – seção superficial: (a) 500x; (b) 1000x; - seção transversal: (c) 500x; (d) 1000x.

Fonte: Autor (2018).

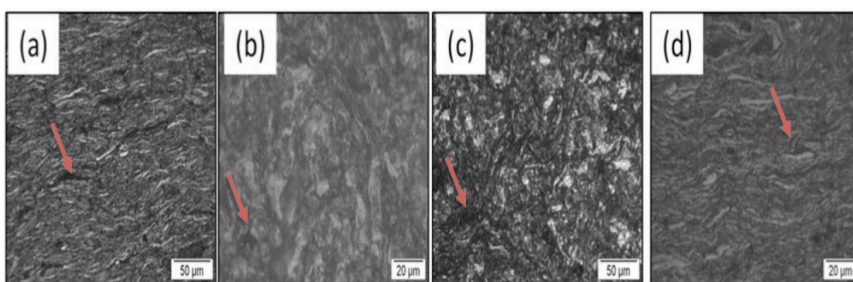


Figura 16. Imagens de MO da liga AA 7013\_2,0h – seção superficial: (a) 500x; (b) 1000x; - seção transversal: (c) 500x; (d) 1000x.

Fonte: Autor (2018).

Percebemos uma distribuição bastante equilibrada do reforço na matriz (processada ao período de 0,5h, 1,0h e 2,0h) em todas as imagens da microscopia ótica (seção superficial e transversal), afirmando a assertiva de que a moagem de alta energia (MAE) é um processo eficiente para a diminuição do tamanho de partícula tanto da matriz quanto do reforço e incorporação dessa partícula de reforço na matriz metálica. Isso garante um material com menor porosidade e propriedades mecânicas superiores, coerente com a teoria das ligas produzidas via metalurgia do pó (MP).

A Figura 17 (a, b) apresentam as imagens de MEV da amostra sinterizada de alumínio AA 1100. A amostra apresenta contornos de grãos bem definidos, morfologia irregular e possui grãos maiores que 30 µm.

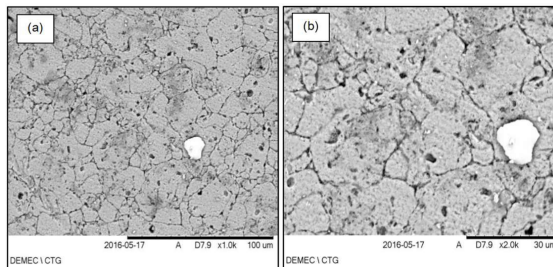


Figura 17. Imagem de MEV da amostra sinterizada Al AA 1100. (a) Aumento de 1000x; (b) Aumento de 2000x.

Fonte: Autor (2018).

A Figura 18 apresenta o EDS da amostra de Al AA 1100. O Grão branco em destaque é identificado pelo EDS como sendo um precipitado contendo picos de Al e impurezas de Fe, além de Cr e Si em menor quantidade.

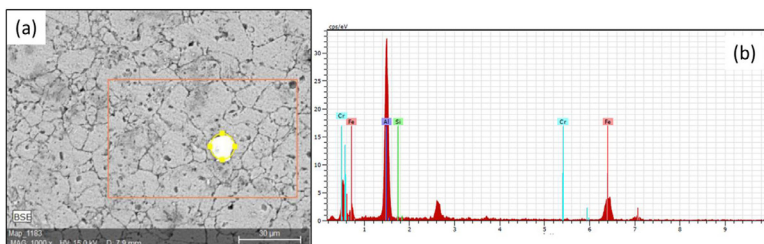


Figura 18. EDS da amostra sinterizada Al AA 1100. (a) Região analisada; (b) Espectro de EDS.

Fonte: Autor (2018).

As figuras 19 a 21 apresentam os resultados de Microscopia Eletrônica de Varredura das seções superficiais das amostras da liga de alumínio AA 7013, com tempo de processamento em MAE de 0,5h, 1,0h e 2,0h com ampliações de 1.000x e 2.000x. Observa-se grãos irregulares e alongados, com o aumento do tempo de moagem há uma maior incorporação dos elementos de liga na matriz.



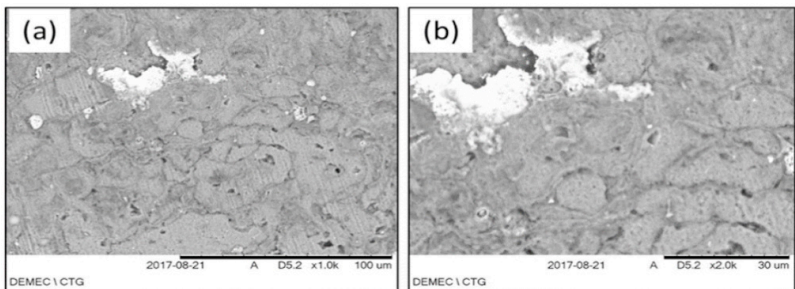


Figura 19. Imagem de MEV da amostra sinterizada AA 7013\_0,5h, seção superficial. (a) Aumento de 1000x; (b) Aumento de 2000x.

Fonte: Autor (2018).

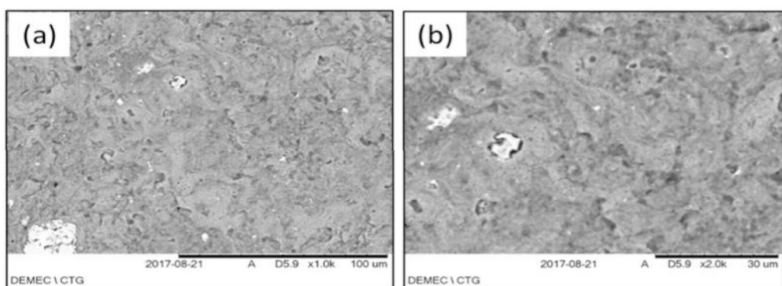


Figura 20. Imagem de MEV da amostra sinterizada AA 7013\_1,0h, seção superficial. (a) Aumento de 1000x; (b) Aumento de 2000x.

Fonte: Autor (2018).

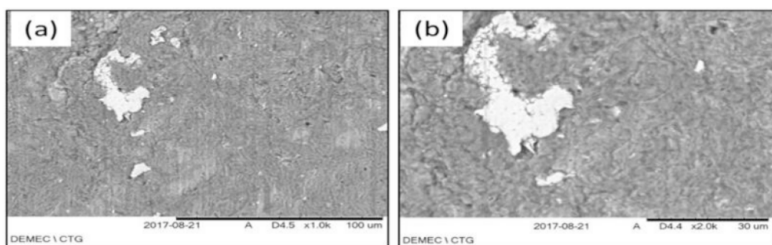


Figura 21. Imagem de MEV da amostra sinterizada AA 7013\_2,0h, seção superficial. (a) Aumento de 1000x; (b) Aumento de 2000x.

Fonte: Autor (2018).

As figuras 22 a 24 apresentam os EDS da amostra da liga sinterizada processada por moagem de alta energia, AA 7013, durante o tempo de 0,5h, 1,0h e 2,0h.

É observado na análise superficial por EDS, na Figura 22 da liga do alumínio AA 7013 processada em moinho de alta energia durante 0,5h, os elementos que compõe esta

liga, além do alumínio há o Zn, Cu, Ti, Si e O. A Figura 23, a liga processada durante 1,0h mostra elementos de Al, Zn, Cu, Ti, Si, Mn e O. Para o tempo de 2,0h, Figura 24, há a presença de Al, Zn, Cu, Fe, Mn, Cr e O. A presença de oxigênio indica que houve oxidação durante o processo de moagem de alta energia.

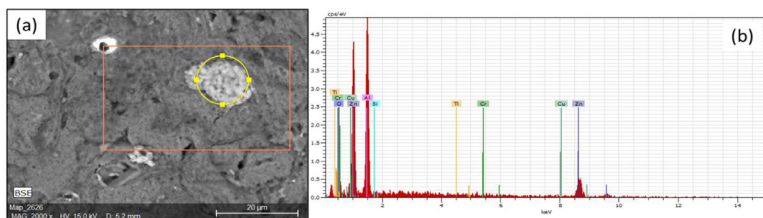


Figura 22. EDS da amostra sinterizada da liga AA 7013\_0,5h, visão superficial. (a) Região analisada; (b) Espectro de EDS

Fonte: Autor (2018).

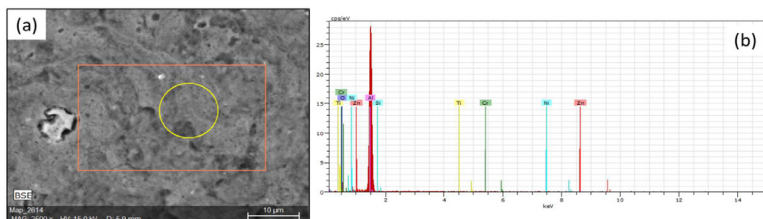


Figura 23. EDS da amostra sinterizada da liga AA 7013\_1,0h, visão superficial. (a) Região analisada; (b) Espectro de EDS

Fonte: Autor (2018).

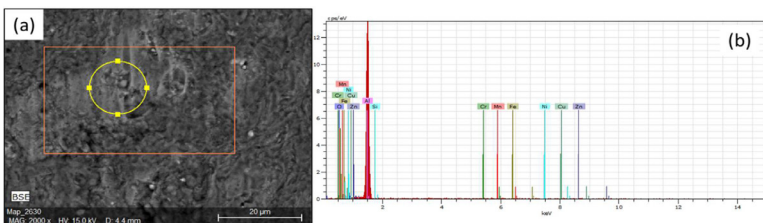


Figura 24. EDS da amostra sinterizada da liga AA 7013\_2,0h, visão superficial. (a) Região analisada; (b) Espectro de EDS

Fonte: Autor (2018).

Nesta etapa do trabalho é apresentado os resultados de *microdureza Vickers*, obtidos após o ensaio das amostras das ligas de Al AA 1100, AA 7013. Durante o ensaio foi realizado 5 endentações em cada superfície (superficial e transversal), sendo aplicado uma

carga de 200 g. A Tabelas 3 apresenta a evolução dos resultados de *microdureza Vickers* das ligas processadas durante 0,5h; 1,0h e 2,0h comparada ao resultado da amostra da liga de Al AA 1100 (alumínio puro), da qual foi usado como base para otimização da obtenção da liga, pois o alumínio puro necessita da combinação de elementos químicos para melhorar ou modificar suas propriedades, sendo a resistência mecânica e dureza.

Seção	SEÇÃO TRANSVERSAL				SEÇÃO SUPERFICIAL			
	AA 1100	AA 7013			AA 1100	AA 7013		
		0,5h	1,0h	2,0h		0,5h	1,0h	2,0h
MÉDIA	31,53	95,62	114,6	138,6	33,46	110,48	114,28	151,8
DESVIO PADRÃO	1,05	10,63	8,23	21,18	4,05	15,03	14,82	27,61

Tabela 3. Resultado Médio de Microdureza *Vickers* – HV – Transversal e Superficial.

Fonte: Autor (2018).

A Figura 25 apresenta a evolução dos valores médios de *Microdureza Vickers* obtidos para cada amostra nas seções transversal e superficial, das amostras processada nos tempos especificados (0,5h; 1,0h e 2,0h). Pode-se notar um comportamento bastante crescente da dureza com o aumento do tempo de moagem. O processo de moagem durante 2,0h da liga AA 7013 obteve um aumento percentual de 339,58% na seção transversal e de 353,68% na seção superficial em relação a liga Al AA 1100.

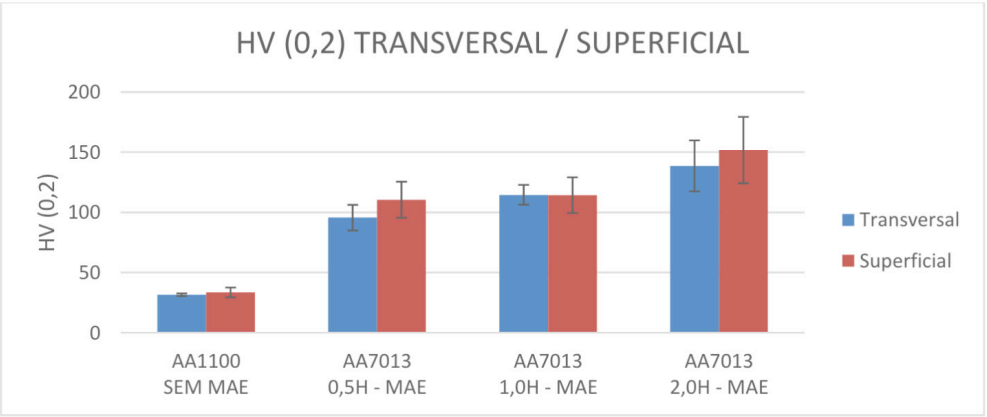


Figura 25. Evolução média da *microdureza Vickers* (HV), utilizando tempo de moagem de 0,5h; 1,0h e 2,0h (seções transversal e Superficial).

Fonte: Autor (2018).

## 4 | CONCLUSÃO

A fabricação das amostras da liga de alumínio AA 7013 processadas durante 0,5h, 1,0h e 2,0h, através da técnica de metalurgia do pó, tomando como a base a liga Al AA 1100. Foi executado com relativo sucesso, através da metalurgia do pó.

Os espectros de DRX dos pós processados por Moagem de Alta Energia, observou-se picos do alumínio da matriz. Foi observado que não houve alterações significativas nos difratogramas para os diferentes tipos de moagem das ligas processadas, apresentaram os mesmos valores de ângulo de difração ( $2\theta$ ) da matriz em alumínio (AA 1100).

Nas imagens de MEV das amostras dos pós, ficou evidente que durante o processamento de 0,5h o material particulado apresentou uma morfologia relativamente achatada e irregular, e durante o processamento de 2,0h ficou evidente a diminuição das partículas do material particulado, apresentando uma morfologia mais regular (ligeiramente arredondadas) e fina.

As imagens de EDS dos pós das ligas processadas em moagem de alta energia (MAE) mostraram de forma semi-quantitativa a presença de elementos de alumínio, zinco, cobre, níquel, manganês, ferro, titânio, cromo, silício e oxigênio, este último presente devido à oxidação na MAE.

No MEV das amostras de pós sinterizadas ficou evidente que a que houve incorporação dos elementos de ligas para as moagens de 0,5, 1,0 e 2,0 horas, cujo tempo de 2,0h teve uma melhor incorporação. As imagens de EDS confirmaram a presença dos elementos de liga de: zinco, cobre, níquel, manganês, ferro, titânio, cromo, silício e oxigênio.

Nas imagens de MO o material consolidado apresentou uma morfologia de grãos irregular e contornos de grãos bem evidenciados e definidos. Com o aumento do tempo de moagem houve um aumento no que concerne às deformações das lamelas (seção transversal). As imagens de MO também mostram uma boa densificação da liga, contudo nota-se a presença de poros.

Os resultados de dureza apresentaram-se linearmente crescente com o aumento do tempo de moagem, destacando o efeito positivo da técnica de Metalurgia do Pó utilizando MAE na produção da liga alumínio AA 7013.

O processo de moagem durante 2,0h da liga AA 7013 obteve um aumento percentual de 339,58% na seção transversal e de 353,68% na seção superficial em relação a liga Al AA 1100.

## REFERÊNCIAS

ASM Handbook. **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**, ASM International (American Society for Metals), Materials Park, Ohio, USA, 1992. v. 2. 3470 p ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. Publicação técnica -Fundamentos e aplicações do alumínio, ABAL, p.22, 2007.

BARBOSA, C. **Metais não ferrosos e suas ligas: microestrutura, propriedades e aplicações**. Ed. E- papers. Rio de Janeiro, 2014.

CHIAVERINI, V. **Metalurgia do pó**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, 2001.

SILVA JUNIOR, Moisés Euclides da. **FABRICAÇÃO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO AA3003 E AA3303 A PARTIR DOS PÓS ELEMENTARES DE ALUMÍNIO E DE MANGANÊS ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE METALURGIA DO PÓ**. 2020. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

SILVA, T. T. L. **Manufatura e caracterização de Alumínio-Cobre (Duralumínio) fabricadas via técnicas de metalurgia do pó**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2017.

SURYANARAYANA, C. **Mechanical alloying and milling**. Progress in Materials Science, Vol. 46, p.1- 184, 2001.

ZHANG, D. L. **Processing of advanced materials using high-energy mechanical milling**, *Progress in Materials Science*, 49, 537-560, 2004.

# CAPÍTULO 6

## FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA LIGA DE ALUMÍNIO AA7009 ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE METALURGIA DO PÓ

Data de aceite: 01/06/2021

Data de submissão: 08/03/2021

### Enéas Carlos de Oliveira Silva

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE  
Recife – PE  
<http://lattes.cnpq.br/5968682154600734>

### Eduardo José Silva

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE  
Recife – PE  
<http://lattes.cnpq.br/3546466947253424>

### Thiago Batista David

Centro Universitário Estácio do Recife  
Recife – PE  
<http://lattes.cnpq.br/2742652536623661>

### Moisés Euclides da Silva Junior

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE  
Recife – PE  
<http://lattes.cnpq.br/9524894169629954>

### Oscar Olimpio de Araujo Filho

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE  
Recife – PE  
<http://lattes.cnpq.br/6740759499723367>

**RESUMO:** Entre as diversas ligas de alumínio, destacam-se as da série 7XXX, aplicadas principalmente em componentes estruturais de aeronaves, pois apresentam níveis mais elevados de resistência e dureza. Assim este trabalho consistiu na fabricação e caracterização da liga de alumínio AA7013, fabricada via metalurgia do pó. Os pós foram processados através da

moagem de alta energia (MAE) durante 0,5, 1,0 e 2,0 horas e em seguida caracterizados por microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de energia dispersiva (EDS), difração de raios-X (DRX) e por fim granulometria por Difração a Laser. Após a caracterização dos pós, eles foram consolidados através de compactação uniaxial a frio, seguida de uma sinterização por fase sólida. Por fim, foi realizada a caracterização microestrutural do sinterizado através de MO e MEV, a composição química do material foi analisada através da técnica de EDS, e em seguida o material foi submetido ao ensaio de microdureza vickers, possibilitando o estudo da propriedade de dureza obtida nos corpos de prova. A liga de Al AA7009 processada por MAE durante 2h apresentou um ganho de 246,23% de dureza na seção superficial e 211,16% na seção transversal, quando comparado com o material consolidado da liga de Al AA1100 sem moagem.

**PALAVRAS-CHAVE:** Metalurgia do pó, moagem de alta energia, liga AA7009.

### MANUFACTURING AND CHARACTERIZATION ALUMINUM ALLOY AA7009 THROUGH OF POWDER METALLURGY TECHNIQUES

**ABSTRACT:** Among the various aluminum alloys, those of the 7XXX series stand out, mainly applied to structural components of aircraft, as they have higher levels of strength and hardness. So this work consisted in the manufacture and characterization of the aluminum alloy AA7013, manufactured via powder metallurgy. The powders were processed through high energy grinding (MAE) for 0.5, 1.0 and 2.0

hours and then characterized by scanning electron microscopy (SEM), dispersive energy spectroscopy (EDS), ray diffraction -X (DRX) and finally Laser Diffraction granulometry. After the characterization of the powders, they were consolidated through cold uniaxial compaction, followed by sintering by solid phase. Finally, the microstructural characterization of the sinter was carried out using OM and SEM, the chemical composition of the material was analyzed using the EDS technique, and then the material was subjected to the vickers microhardness test, enabling the study of the obtained hardness property in the specimens. The Al AA7013 alloy processed by MAE for 2h showed a gain of 353.68% of hardness in the surface section and 339.58% in the cross section, when compared with the consolidated material of the Al AA1100 alloy without grinding.

**KEYWORDS:** Powder metallurgy, mechanical alloying, AA7009 alloy.

## 1 | INTRODUÇÃO

O aumento no consumo de alumínio é a prova do que este metal significa na indústria moderna. O alumínio segue o ferro/aço entre os metais de maior consumo anual, sendo o mais importante dos metais não ferrosos. Dentre as características físico-químicas, destaca-se o seu baixo peso específico, comparado com outros metais de grande consumo, resistência à corrosão e alta condutibilidade elétrica/térmica (ABAL, 2007).

Um dos motivos que torna o alumínio tão atrativo, é o fato de poder combinar-se com a maioria dos metais de engenharia, formando ligas a partir destas combinações para obtenção de características tecnológicas. Dentre essas, destacam-se as ligas da série 7XXX (Al, Zn), utilizada principalmente na indústria aeronáutica (fuselagem de aeronaves), pois oferece uma maior resistência mecânica (ASM, 1992).

O alumínio e suas ligas atualmente são processados por técnicas de metalurgia com aplicações no setor industrial em grande escala (BARBOSA, 2014; CHIAVERINI, 2001). A metalurgia do pó é um processo de fabricação que consiste na manufatura de peças a partir da consolidação de pós metálicos, possui baixo custo econômico, utiliza o aproveitamento máximo da matéria-prima (acima de 95%) e obtenção de peças com formas complexas. Tornando-se assim muitas vezes mais competitivo do que outros processos de fabricação (CHIAVERINI, 2001).

O presente trabalho consiste em fabricar ligas de alumínio AA7009, utilizando o processo de fabricação por metalurgia do pó. Os pós foram misturados e homogeneizados através de técnicas de moagem de alta energia, submetidos a uma compactação uniaxial, obtendo forma e dimensionamento, e por fim sinterização por fase sólida, promovendo uma maior rigidez, dureza e resistência mecânica dos materiais processados.

## 2 | METODOLOGIA

Este capítulo tem o objetivo de descrever de forma clara e sucinta todos os materiais e procedimentos utilizados na fabricação da liga de alumínio AA7013. Inicialmente foi

selecionada a composição das ligas a serem fabricadas de acordo com o *ASM Handbook* (1992), de posse dos percentuais referentes a cada elemento das ligas, os pós elementares foram separados e em seguida pesados em uma balança analítica. Posteriormente esses pós foram submetidos a moagem de alta energia (MAE) através de um moinho de bolas vibratório do tipo SPEX, durante 0,5, 1,0 e 2,0 horas.

A caracterização microestrutural e química do material particulado foi realizada através das técnicas de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS), o estudo e identificação das fases geradas após a MAE foi realizado através de difração de RX.

Os pós processados por MAE e o pó da liga de alumínio puro AA1100 foram consolidados através de compactação uniaxial a frio e sinterização por fase sólida.

Para tal estudo foram fabricados três corpos de prova sinterizados para cada um dos tempo de moagem e mais 3 corpos de prova sinterizados da liga de alumínio AA1100 sem moagem, totalizando assim, 12 corpos de prova, em seguida os corpos de prova foram submetidos ao processo de preparação metalográfica (corte, embutimento, lixamento, polimento e ataque químico). A caracterização microestrutural e química do material consolidado, foi realizada através das técnica de microscopia ótica (MO), microscopia eletrônica de varredura (MEV) associada a espectroscopia de energia dispersiva (EDS). Finalizando o processo de caracterização do material consolidado, os corpos de prova sinterizados foram submetidos a um ensaio de microdureza *Vickers*, determinando assim a propriedade de dureza do material estudado.

2.1 Pesagem dos pós

As massas dos pós elementares foram pesadas utilizando-se uma balança analítica com precisão de 4 casas decimais, da marca SHIMADZU, modelo ATI224.

A Tabela 1 mostra a quantidade de massa (g) utilizada na moagem de alta energia para a fabricação das ligas de alumínio. A massa total calculada para processamento dos pós foi 12g + ácido esteárico (2% da massa total), totalizando 12,24g (pó).

Amostra	Tempo de Moagem	Al Puro (g)	Si (g)	Fe (g)	Cu (g)	Mn (g)	Zn (g)	Ti (g)	ACP (g)	Massa da Esfera (g)
AA 7009	0,5h	11,0887	0,0241	0,0244	0,1563	0,0121	0,6722	0,0245	0,2439	120
	1,0h	11,0881	0,0243	0,0247	0,1564	0,0126	0,672	0,0241	0,2415	120
	2,0h	11,0883	0,0243	0,0246	0,1565	0,0125	0,6725	0,0245	0,2406	120

Tabela 1. Composição química das ligas de alumínio AA 7013.  
Fonte: Adaptado de ASM HandBook (1992).



## 2.2 Processamento dos pós (MAE)

Para o processamento dos pós, utilizou-se um moinho vibratório de alta energia do tipo SPEX Figura 1, equipamento este, comumente empregado no processamento de amostras em laboratório. material foi processado durante períodos de 0,5, 1,0 e 2,0 horas, a uma velocidade de rotação de 720 rpm.



Figura 1. Moinho de bolas vibratório (SPEX).

Fonte: Silva Junior (2020).

Os pós foram colocados na jarra (recipiente de moagem) fabricada em aço inox 304L e como corpo de moagem foi utilizado esferas metálicas. A relação de massa de esfera/massa de pó foi de 10:1, ou seja, para cada 120g de esferas foram utilizadas 12g de massa dos pós.

## 2.3 Compactação e sinterização

Os pós processados foram submetidos a uma compactação uniaxial a frio, em numa prensa hidráulica. O tempo de aplicação da carga foi de 10 minutos a uma pressão de 40 ton. O produto resultante da compactação por apresentar alguma consistência e resistência mecânica limitada, é denominado de “compactado verde”. O material compactado ganhou forma e dimensionamento específico, obtendo diâmetro de 17,00mm e espessura de 9,15mm, conforme ilustrado na figura 2.

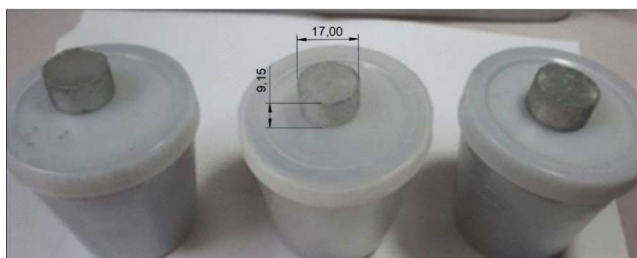


Figura 2. Amostras de compactado verde.

Fonte: Autor (2018).

Logo após a compactação, as amostras (compactado verde) foram sinterizadas num forno tipo Mufla, as amostras foram sinterizadas durante 5h a uma temperatura de 500 °C, com um taxa de aquecimento de 20 °C/min. Com o término do aquecimento o forno foi desligado e a temperatura resfriada calmamente dentro do forno até permanecer na temperatura ambiente com uma taxa de resfriamento foi de 0,459 °C/min.

## 2.4 Preparação metalográfica

Para a análise no microscópio ótico, foram utilizadas as amostras sinterizadas. Elas foram cortadas (particionadas) em uma “*cut-off*”, foi usado uma máquina de policorte, da marca Arotec, modelo COR 80, sendo usado como meio cortante um disco de corte abrasivo (óxido de silicato). O principal objetivo do corte foi obter para estudo as secções superficiais e transversais. Logo após processo de corte dos materiais, as amostras foram submetidas ao processo de embutimento a quente.

Com as amostras embutidas, a etapa subsequente é a de lixamento. A técnica utilizada para o lixamento foi a manual, que consiste em lixar a amostra sucessivamente com lixa de granulometria cada vez menor. Para este trabalho foram utilizadas as lixas metalográficas com granulometrias de: 180#, 240#, 320#, 600#, 800#, 1000# e 1200#.

Após o lixamento, a próxima etapa é a do polimento, que tem como principal função eliminar os riscos e marcas da superfície. Para o polimento das amostras foi utilizada uma pasta de diamante de 3 µm e 1 µm, dando um melhor acabamento para a amostra, pano de polimento adequado. A politriz usada no polimento é da marca Arotec, modelo Aropol 2V.

Por fim, com o intuito de revelar os contrastes das fases, as amostras foram submetidas ao ataque químico, através de uma solução aquosa de ácido fluorídrico a 0,5% durante um tempo de 15 segundos, através do método de esfregação, posteriormente as amostras foram lavadas com água corrente, etanol e em seguida secadas por um jato de ar quente paralelamente a superfície atacada.

## 2.5 Caracterização do material consolidado

Os corpos de prova dos materiais consolidados foram submetidos a caracterização microestrutural, através das técnicas de microscopia ótica (MO), e microscopia eletrônica de varredura (MEV), a análise de composição química pontual foi realizada através do sensor de EDS acoplado ao MEV utilizado. Por fim as amostras foram submetidas ao ensaio de microdureza Vickers.

## 3 | RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos através do presente trabalho.

### 3.1 Caracterização do material particulado

A Figura 3 representa o espectro de raios – X para o Al AA 1100. No difratograma, o alumínio apresenta estrutura CFC, conforme a literatura este tipo de estrutura deve ter os valores dos índices de Miller (h, k e l) todos números pares ou ímpares (CALLISTER, 2012).

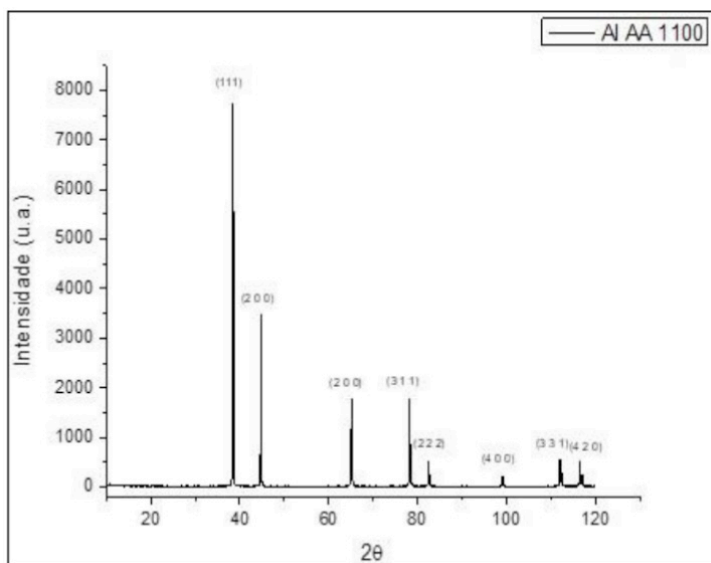


Figura 3. Espectro de DRX para o Al AA 1100.

Fonte: Autor (2018).

Na Figura 4 são apresentados os difratogramas das amostras de pós da liga de alumínio AA 7013, processadas durante 0,5, 1,0 e 2,0 horas através de moagem de alta energia. Observa-se que não houve alterações significativas nos difratogramas para os diferentes tempos de moagem. Observa-se uma variação de intensidade dos picos com relação à liga processada durante 2,0h, apesar da mudança na intensidade dos picos, os valores de ângulos de difração ( $2\theta$ ) da matriz em alumínio (AA 1100) são os mesmos. Eventualmente outras fases dos elementos de ligas adicionados ao AA 1100 não foram identificados, pois ficou abaixo da resolução do equipamento, inferior a 5%.

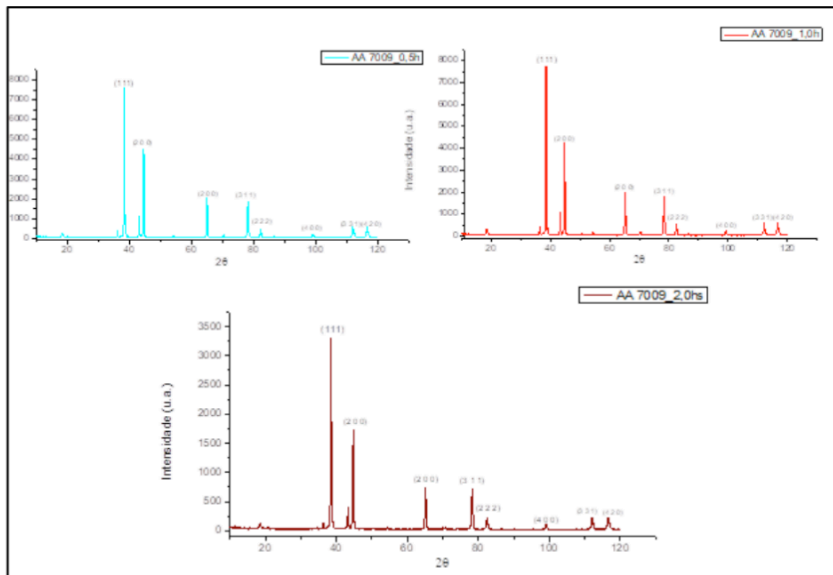


Figura 4. Espectros de DRX para a liga AA 7009 processada por 0,5h, 1,0h e 2,0h.

Fonte: Autor (2018)

A Figura 5 (a, b) apresenta as imagens de MEV do pó de Al AA 1100 (alumínio comercialmente puro), como recebido, utilizado neste trabalho.

A Figura 5 destaca a morfologia original, predominantemente esférica (grãos equiaxiais) do Al AA 1100 recebido para pesquisa obtidas por Silva (2017), sem reforço e sem sofrer o processo de moagem de alta energia (MAE). Essa morfologia é típica de material dúctil e de pó fabricado pelo método de atomização a ar, que promove a solidificação do metal em partículas finamente divididas. A Figura 6 (a,b) foram obtidas por Silva (2017) e apresenta a região analisada e o espectro de EDS do pó de Al AA 1100. A análise de EDS do AA 1100 demonstra apenas o espectro de Al na composição. É importante ressaltar que não foi identificada a presença de contaminação neste pó.

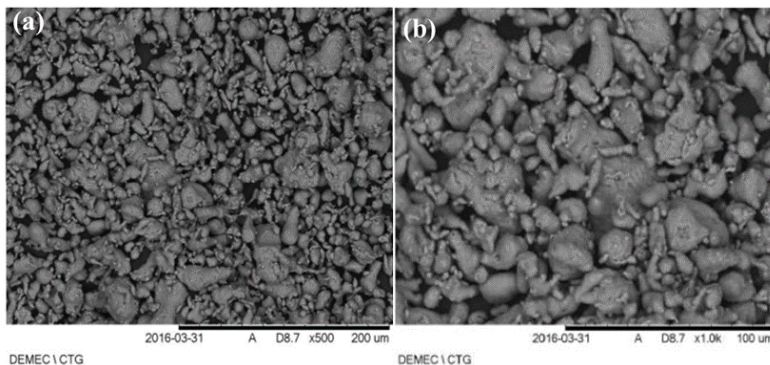


Figura 5. Imagem de MEV – Al AA 1100. (a) aumento de 500x; (b) aumento de 1000x.

Fonte: Silva (2017).

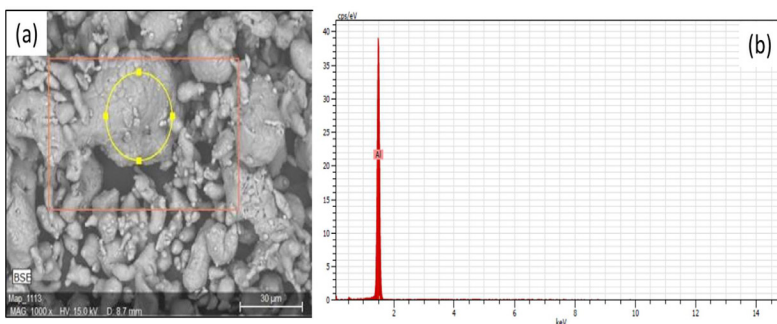


Figura 6. EDS do Al AA 1100. (a) Região analisada; (b) Espectro de EDS.

Fonte: Silva (2017).

As Figuras 5 a 7 apresentam as imagens de MEV para a liga processada AA 7009 durante o tempo de 0,5h, 1,0h e 2,0h. Para a amostra de pó processada no moinho de alta energia durante 0,5h, a liga de alumínio AA 7009 apresentou uma morfologia relativamente achatada e irregular. Observa-se que com o aumento do tempo de moagem para 1h, as partículas começam a diminuir e ficar menos achatadas e em 2h, a morfologia dos pós vai tendendo para uma forma mais regular.

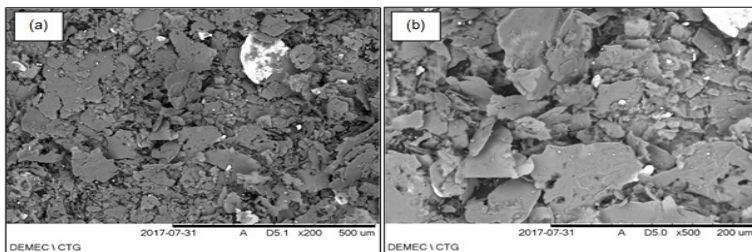


Figura 7. Imagem de MEV da liga AA 7009\_0,5h. (a) Aumento de 200x; (a) aumento de 500x.

Fonte: Autor (2018).

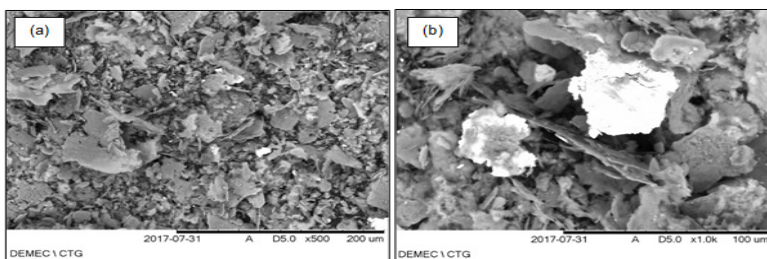


Figura 8. Imagem de MEV da liga AA 7009\_1,0h. (a) Aumento de 200x; (a) aumento de 500x.

Fonte: Autor (2018).

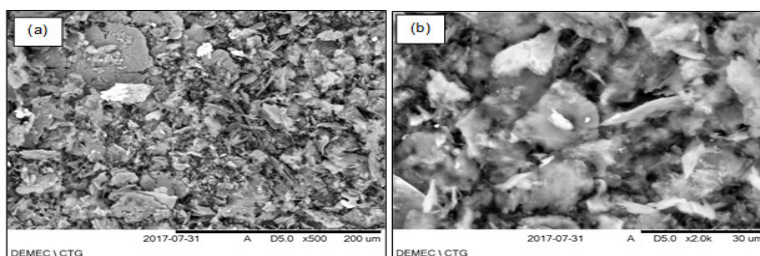


Figura 9. Imagem de MEV da liga AA 7009\_2,0h. (a) Aumento de 200x; (a) aumento de 500x.

Fonte: Autor (2018).

As figuras 10 a 12 apresentam os EDS das amostras de pós processados em 0,5h, 1,0h e 2,0h por moagem de alta energia.

A análise por EDS, na Figura 10, da liga de alumínio AA 7009 processada em moinho de alta energia durante 0,5h, mostra os elementos que compões esta liga, além do alulmínio há o Fe, Ni, Cu, Zn, Mn, Ti e Si. A Figura 11, processada durante 1,0h mostra elementos de Zn, Cu e O, a presença de oxigênio indica que houve oxidação durante o processo de moagem de alta energia. Para o tempo de 2,0h, Figura 12, há presença de Al, Zn, Cr, Mn, Ti e O.

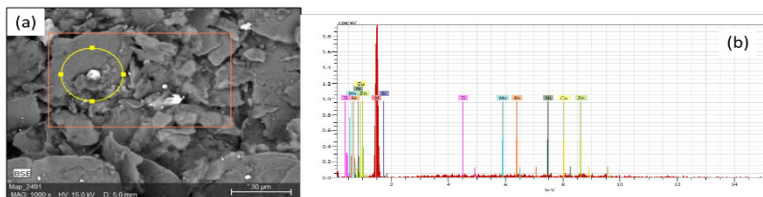


Figura 10. EDS do pó de AA 7009\_0,5h. (a) Região analisada; b) Espectro de EDS.

Fonte: Autor (2018).

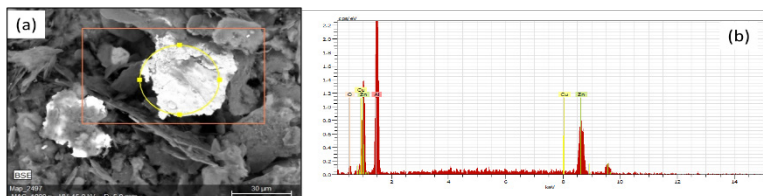


Figura 11. EDS do pó de AA 7009\_1,0h. (a) Região analisada; b) Espectro de EDS.

Fonte: Autor (2018).

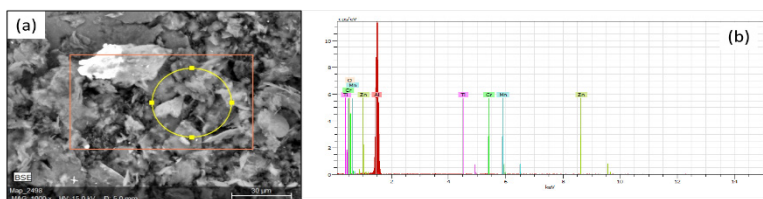


Figura 12. EDS do pó de AA 7009\_0,5h. (a) Região analisada; b) Espectro de EDS.

Fonte: Autor (2018).

### 3.2 Caracterização do material consolidado

Foram submetidas a caracterização via Microscopia Ótica a amostra sinterizadas de Al AA 1100 e amostras sinterizadas dos pós processados por MAE da liga AA 7013.

As Figuras 13 (a, b) apresentam a amostra de Al AA 1100 sinterizada. A imagem de MO do Al AA 1100 apresenta boa homogeneidade e densificação.



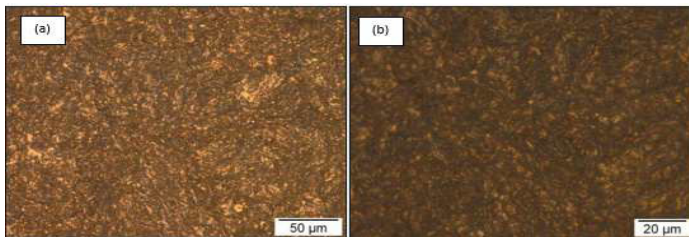


Figura 13. Imagens de MO da liga AA 1100 – seção superficial: (a) 500x; (b) 1000x.

Fonte: Autor (2018).

As Figuras de 14 a 16 apresentam os resultados da microscopia ótica nas amostras das ligas de Alumínio AA 7009 das seções superficiais e transversais com tempo de processamento no MAE de 0,5h, 1,0h e 2,0h com duas ampliações de 500x e 1000x. É possível observar uma morfologia de grãos irregular e contornos de grãos definidos. Notamos que com o aumento do tempo de moagem houve um aumento no que concerne às deformações das lamelas, ilustradas nas seções transversais.

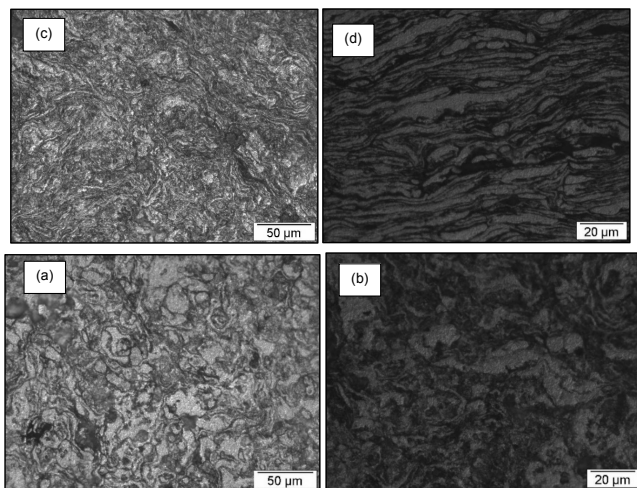


Figura 14. Imagens de MO da liga AA 7009\_0,5h – seção superficial: (a) 500x; (b) 1000x; - seção transversal: (c) 500x; (d) 1000x.

Fonte: Autor (2018).



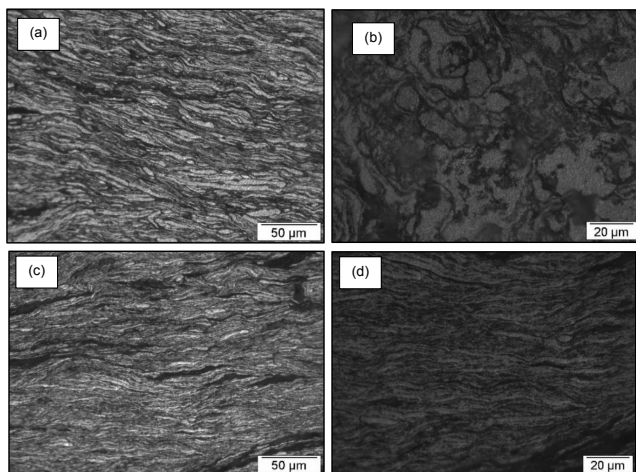


Figura 15. Imagens de MO da liga AA 7009\_1,0h – seção superficial: (a) 500x; (b) 1000x; - seção transversal: (c) 500x; (d) 1000x.

Fonte: Autor (2018).

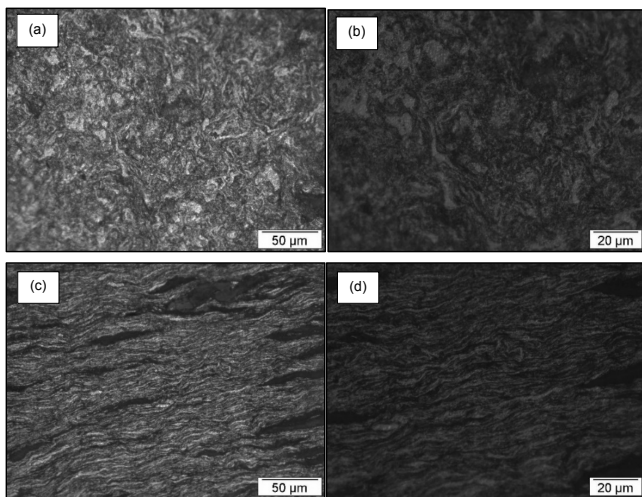


Figura 16. Imagens de MO da liga AA 7009\_2,0h – seção superficial: (a) 500x; (b) 1000x; - seção transversal: (c) 500x; (d) 1000x.

Fonte: Autor (2018).

Percebemos uma distribuição bastante equilibrada do reforço na matriz (processada ao período de 0,5h, 1,0h e 2,0h) em todas as imagens da microscopia ótica (seção superficial e transversal), afirmando a assertiva de que a moagem de alta energia (MAE) é um processo eficiente para a diminuição do tamanho de partícula tanto da matriz quanto do reforço e incorporação dessa partícula de reforço na matriz metálica. Isso garante um

material com menor porosidade e propriedades mecânicas superiores, coerente com a teoria das ligas produzidas via metalurgia do pó (MP).

A Figura 17 (a, b) apresentam as imagens de MEV da amostra sinterizada de alumínio AA 1100. A amostra apresenta contornos de grãos bem definidos, morfologia irregular e possui grãos maiores que 30  $\mu\text{m}$ .

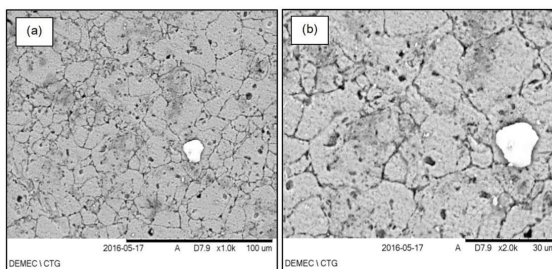


Figura 17. Imagem de MEV da amostra sinterizada Al AA 1100. (a) Aumento de 1000x; (b) Aumento de 2000x.

Fonte: Autor (2018).

A Figura 18 apresenta o EDS da amostra de Al AA 1100. O Grão branco em destaque é identificado pelo EDS como sendo um precipitado contendo picos de Al e impurezas de Fe, além de Cr e Si em menor quantidade.

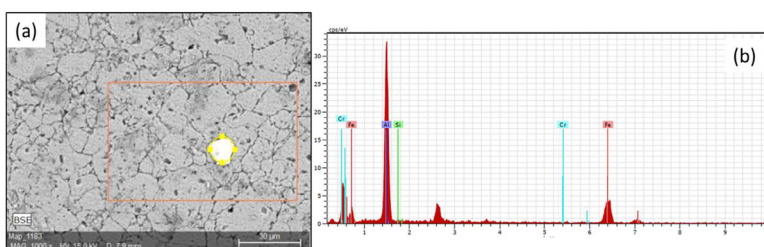


Figura 18. EDS da amostra sinterizada Al AA 1100. (a) Região analisada; (b) Espectro de EDS.

Fonte: Autor (2018).

As figuras 19 a 21 apresentam os resultados de Microscopia Eletrônica de Varredura das seções superficiais das amostras da liga de alumínio AA 7009, com tempo de processamento em MAE de 0,5h, 1,0h e 2,0h com ampliações de 1.000x e 2.000x. Observa-se grãos irregulares e alongados, com o aumento do tempo de moagem há uma maior incorporação dos elementos de liga na matriz.

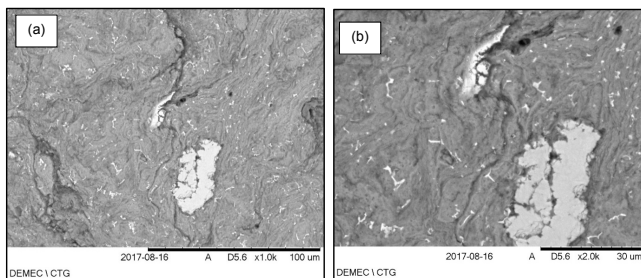


Figura 19. Imagem de MEV da amostra sinterizada AA 7009\_0,5h, seção superficial. (a) Aumento de 1000x; (b) Aumento de 2000x.

Fonte: Autor (2018).

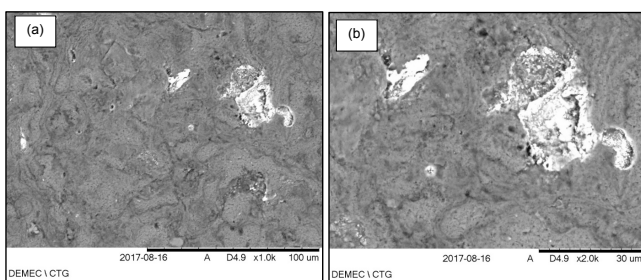


Figura 20. Imagem de MEV da amostra sinterizada AA 7009\_1,0h, seção superficial. (a) Aumento de 1000x; (b) Aumento de 2000x.

Fonte: Autor (2018).

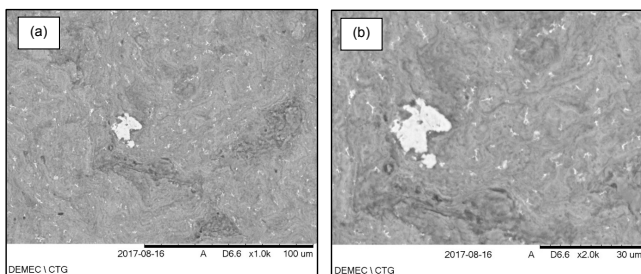


Figura 21. Imagem de MEV da amostra sinterizada AA 7009\_2,0h, seção superficial. (a) Aumento de 1000x; (b) Aumento de 2000x.

Fonte: Autor (2018).

As figuras 22 a 24 apresentam os EDS da amostra da liga sinterizada processada por moagem de alta energia, AA 701, durante o tempo de 0,5h, 1,0h e 2,0h.

É observado na análise superficial por EDS, na Figura 22 da liga do alumínio AA 7013 processada em moinho de alta energia durante 0,5h, os elementos que compõe esta

liga, além do alumínio há o Zn, Cu, Ti, Si e O. A Figura 23, a liga processada durante 1,0h mostra elementos de Al, Zn, Cu, Ti, Si, Mn e O. Para o tempo de 2,0h, Figura 24, há a presença de Al, Zn, Cu, Fe, Mn, Cr e O. A presença de oxigênio indica que houve oxidação durante o processo de moagem de alta energia.

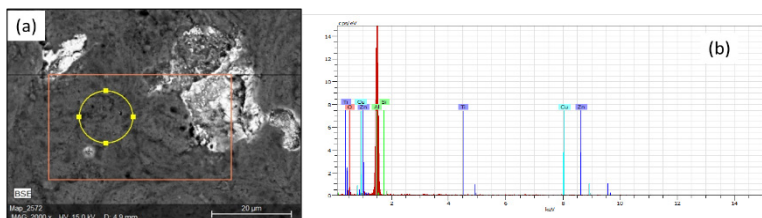


Figura 22. EDS da amostra sinterizada da liga AA 7013\_0,5h, visão superficial. (a) Região analisada; (b) Espectro de EDS

Fonte: Autor (2018).

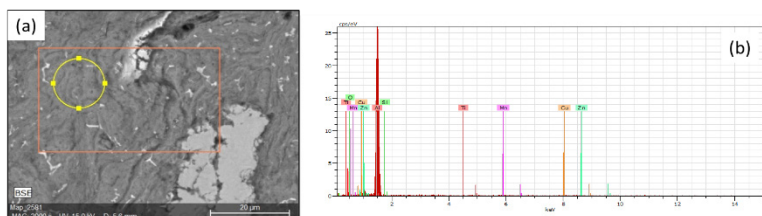


Figura 23. EDS da amostra sinterizada da liga AA 7013\_1,0h, visão superficial. (a) Região analisada; (b) Espectro de EDS

Fonte: Autor (2018).

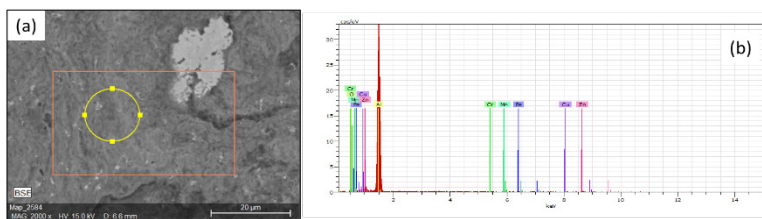


Figura 24. EDS da amostra sinterizada da liga AA 7013\_2,0h, visão superficial. (a) Região analisada; (b) Espectro de EDS

Fonte: Autor (2018).

Nesta etapa do trabalho é apresentado os resultados de *microdureza Vickers*, obtidos após o ensaio das amostras das ligas de Al AA 1100, AA 7009. Durante o ensaio foi realizado 5 endentações em cada superfície (superficial e transversal), sendo aplicado uma

carga de 200 g. A Tabela 3 apresenta a evolução dos resultados de *microdureza Vickers* das ligas processadas durante 0,5h; 1,0h e 2,0h comparada ao resultado da amostra da liga de Al AA 1100 (alumínio puro), da qual foi usado como base para otimização da obtenção da liga.

Seção	SEÇÃO TRANSVERSAL				SEÇÃO SUPERFICIAL			
	AA 1100	AA 7009			AA 1100	AA 7009		
		0,5h	1,0h	2,0h		0,5h	1,0h	2,0h
MÉDIA	31,53	87,18	92,28	98,12	33,46	90,54	104,26	109,18
DESVIO PADRÃO	1,05	8,82	7,13	6,13	4,05	16,17	11,7	24,39

Tabela 3. Resultado Médio de Microdureza *Vickers* – HV – Transversal e Superficial.

Fonte: Autor (2018).

A Figura 25 apresenta a evolução dos valores médios de *Microdureza Vickers* obtidos para cada amostra nas seções transversal e superficial, das amostras processada nos tempos especificados (0,5h; 1,0h e 2,0h). Pode-se notar um comportamento bastante crescente da dureza com o aumento do tempo de moagem. O processo de moagem durante 2,0h da liga AA 7009 obteve um aumento percentual de 211,16% na seção transversal e de 246,23% na seção superficial em relação a liga Al AA 1100.

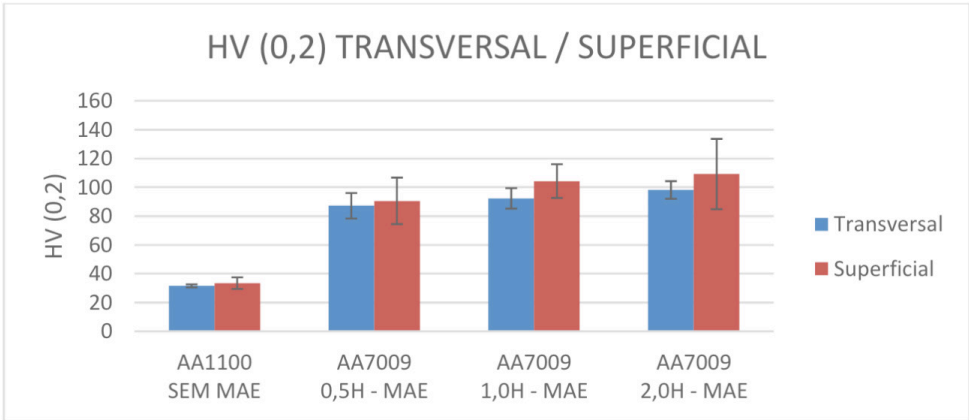


Figura 25. Evolução média da *microdureza Vickers* (HV), utilizando tempo de moagem de 0,5h; 1,0h e 2,0h (seções transversal e Superficial).

Fonte: Autor (2018).

## 4 | CONCLUSÃO

A fabricação das amostras da liga de alumínio AA 7013 processadas durante 0,5h, 1,0h e 2,0h, através da técnica de metalurgia do pó, tomando como a base a liga Al AA 1100. Foi executado com relativo sucesso, através da metalurgia do pó.

Os espectros de DRX dos pós processados por Moagem de Alta Energia, observou-se picos do alumínio da matriz. Foi observado que não houve alterações significativas nos difratogramas para os diferentes tipos de moagem das ligas processadas, apresentaram os mesmos valores de ângulo de difração ( $2\theta$ ) da matriz em alumínio (AA 1100).

Nas imagens de MEV das amostras dos pós, ficou evidente que durante o processamento de 0,5h o material particulado apresentou uma morfologia relativamente achatada e irregular, e durante o processamento de 2,0h ficou evidente a diminuição das partículas do material particulado, apresentando uma morfologia mais regular (ligeiramente arredondadas) e fina.

As imagens de EDS dos pós das ligas processadas em moagem de alta energia (MAE) mostraram de forma semi-quantitativa a presença de elementos de alumínio, zinco, cobre, níquel, manganês, ferro, titânio, cromo, silício e oxigênio, este último presente devido à oxidação na MAE.

No MEV das amostras de pós sinterizadas ficou evidente que a que houve incorporação dos elementos de ligas para as moagens de 0,5, 1,0 e 2,0 horas, cujo tempo de 2,0h teve uma melhor incorporação. As imagens de EDS confirmaram a presença dos elementos de liga de: zinco, cobre, níquel, manganês, ferro, titânio, cromo, silício e oxigênio.

Nas imagens de MO o material consolidado apresentou uma morfologia de grãos irregular e contornos de grãos bem evidenciados e definidos. Com o aumento do tempo de moagem houve um aumento no que concerne às deformações das lamelas (seção transversal). As imagens de MO também mostram uma boa densificação da liga, contudo nota-se a presença de poros.

Os resultados de dureza apresentaram-se linearmente crescente com o aumento do tempo de moagem, destacando o efeito positivo da técnica de Metalurgia do Pó utilizando MAE na produção da liga alumínio AA 7009.

O processo de moagem durante 2,0h da liga AA 7013 obteve um aumento percentual de 211,20% na seção transversal e de 246,23% na seção superficial em relação a liga Al AA 1100.

## REFERÊNCIAS

ASM Handbook. **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**, ASM International (American Society for Metals), Materials Park, Ohio, USA, 1992. v. 2. 3470 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Publicação técnica -Fundamentos e aplicações do alumínio**, ABAL, p.22, 2007.

BARBOSA, C. **Metais não ferrosos e suas ligas: microestrutura, propriedades e aplicações**. Ed. E-papers. Rio de Janeiro, 2014.

CHIAVERINI, V. **Metalurgia do pó**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, 2001.

SILVA JUNIOR, Moisés Euclides da. **FABRICAÇÃO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO AA3003 E AA3303 A PARTIR DOS PÓS ELEMENTARES DE ALUMÍNIO E DE MANGANÊS ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE METALURGIA DO PÓ**. 2020. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

SILVA, T. T. L. **Manufatura e caracterização de Alumínio-Cobre (Duralumínio) fabricadas via técnicas de metalurgia do pó**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2017.



# CAPÍTULO 7

## FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA LIGA DE ALUMÍNIO AA8011 ATRAVÉS DAS TÉCNICAS DE METALURGIA DO PÓ

Data de aceite: 01/06/2021

Data de submissão: 04/03/2021

### **Sandra Torres Zarzar**

Universidade Federal de Pernambuco  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Recife - PE  
<http://lattes.cnpq.br/0384873279545386>

### **Diogo Monteiro do Nascimento**

Universidade Federal de Pernambuco  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Recife - PE  
<http://lattes.cnpq.br/4769727508932728>

### **José Endreo Baracho da Costa**

Universidade Federal de Pernambuco  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Recife - PE  
<http://lattes.cnpq.br/7388580133360768>

### **Moisés Euclides da Silva Junior**

Universidade Federal de Pernambuco  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Recife - PE  
<http://lattes.cnpq.br/9524894169629954>

### **Oscar Olimpio de Araujo Filho**

Universidade Federal de Pernambuco  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Recife - PE  
<http://lattes.cnpq.br/6740759499723367>

**RESUMO** Foi fabricada a liga de alumínio AA8011 através da técnica de metalurgia do pó. Os pós foram processados através da moagem de alta

energia (MAE) durante 30, 60, 120 minutos e em seguida caracterizados por microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de energia dispersiva (EDS), difração de raios-x (DRX) e granulometria por Difração a Laser. Após a caracterização dos pós, os pós foram consolidados através de compactação uniaxial a frio, seguida sinterização e de extrusão a quente. A caracterização do sinterizado e extrudado foi feita através de MO, MEV e microdureza vickers. A caracterização do material particulado evidenciou uma diminuição do tamanho das partículas da mistura dos pós com o aumento do tempo de processamento, o material sinterizado demonstrou uma porosidade acentuada, baixa densificação e uma microestrutura não homogênea, o material extrudado apresentou uma baixa porosidade, boa densificação e uma microestrutura com boa homogeneização, foram observados precipitados ternários (AlFeSi) e binários (AlSi) nas imagens da microscopia eletrônica de varredura, e identificadas as suas composições químicas por espectroscopia de energia dispersiva.

**PALAVRAS-CHAVE:** AA8011, ligas de alumínio, metalurgia do pó, extrusão a quente.

### MANUFACTURING AND CHARACTERIZATION OF THE ALUMINUM ALLOY AA8011 THROUGH POWDER METALLURGY TECHNIQUES

**ABSTRACT:** The AA8011 aluminum alloy was manufactured through powder metallurgy technique. The powders were processed through high energy ball milling (HEBM) for 30, 60, 120 minutes and then characterized by scanning



electron microscopy (SEM), dispersive energy spectroscopy (EDS), x-ray diffraction (XRD) and Laser Diffraction granulometry. After the characterization of the powders, the powders were consolidated through cold uniaxial compaction, followed by sintering and hot extrusion. The characterization of the of the sintered and extruded was carried out using OM, SEM and vickers microhardness test. The characterization of the particulate material showed a decrease in the size of the powder mixture particles with an increase in the processing time, the sintered material demonstrated a marked porosity, low densification and a non-homogeneous microstructure, the extruded material demonstrated a low porosity, good densification and a microstructure with good homogenization, ternary (AlFeSi) and binary (AlSi) precipitates were observed in the scanning electron microscopy images, and their chemical compositions were identified by dispersive energy spectroscopy.

**KEYWORDS:** AA8011, aluminium alloys, powder metallurgy, hot extrusion.

## 1 | INTRODUÇÃO

O alumínio é um elemento metálico encontrado de forma abundante na crosta terrestre, geralmente na forma de óxido. Foi descoberto e isolado nas primeiras décadas do século XIX. Com a criação do processo de refino, foi possível produzi-lo em escala comercial, o que promoveu a redução dos custos de fabricação e o consequente aumento na utilização deste metal não ferroso (BARBOSA, 2014).

As ligas de alumínio possuem vasta aplicação nos setores aeroespacial e automotivo devido às suas propriedades mecânicas superiores, como resistência à tração, densidade relativa, ductilidade, formabilidade, trabalhabilidade e resistência à corrosão (MEIGNAMOORTHY *et al.*, 2019). Devido ao excelente comportamento das ligas sob os diferentes pontos de vista de suas propriedades mecânicas, essas propriedades podem ser modificadas para satisfazer diferentes aplicações (TORRALBA *et al.*, 2003).

Uma das áreas de desenvolvimento mais ativas na metalurgia do alumínio está na série 8xxx (SHACKELFORD, 2008). As ligas de alumínio desta série têm como principal elemento de liga um elemento diferente das demais ligas de alumínio classificadas pela *Aluminum Association* (AA). Alguns exemplos dessas ligas são as formadas por binários Al-Li, Al-Fe, Al-Sn e ternários Al-Cu-Li, Al-Mg-Si, Al-Fe-Si (BARBOSA, 2014).

A Metalurgia do Pó (MP) é uma técnica de produção emergente para a fabricação de componentes com forma final ou próximas a final nas indústrias. Vários tipos de elementos podem ser misturados e propriedades únicas podem ser obtidas via MP (MEIGNAMOORTHY *et al.*, 2018). A MP oferece algumas vantagens em comparação com outros processos metalúrgicos, tal como a baixa temperatura de fabricação e é uma técnica que permite obter materiais que não podem ser obtidos por nenhuma outra rota alternativa (TORRALBA *et al.*, 2003).

A extrusão a quente é um processo que permite formas mais complexas quando são empregados metais com facilidade de serem extrudados, como o alumínio. Nesses

materiais, é possível obter formas finais com excelentes tolerâncias dimensionais e qualidades superficiais (DIETER, 1981). A extrusão na maioria dos metais é realizada a quente devido às forças necessárias para produzir a deformação (CHIAVERINI, 1986).

O presente trabalho teve como objetivo principal a fabricação e caracterização da liga de alumínio AA8011 via Metalurgia do Pó, por meio da moagem de alta energia, compactação a frio, seguida de extrusão a quente.

## 2 | MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento experimental realizado na liga AA8011 consistiu-se na caracterização dos pós, processamento dos pós através da moagem de alta energia (MAE), compactação e extrusão a quente. Seguindo com o processo de caracterização estrutural através da Microscopia ótica (MO), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) e ensaio de microdureza Vickers.

Foram empregados pós elementares cuja composição das amostras utilizada para compor as ligas estão indicados na Tabela 1. Os percentuais dos pós utilizados foram obtidos e escolhidos a partir da classificação da *Aluminum Association* encontrados no Vol. II do ASM Handbook (1990). Como agente controlador do processo (ACP) foi utilizado o composto orgânico ácido esteárico ( $C_{18}H_{36}O_2$ ), em proporção de 1% da massa total do pó no processo de moagem.

Silício (Si)	Ferro (Fe)	Cobre (Cu)	Manganês (Mn)	Zinco (Zn)	Alumínio (Al)
0,9 %	0,6 %	0,1 %	0,2%	0,1 %	98,10 %

Tabela 1. Composição química liga AA8011.

Fonte: ASM Handbook (1990).

### 2.1 Processamento dos Pós

Para o processamento dos pós por moagem de alta energia, foi utilizado um moinho vibratório de alta energia SPEX, comumente utilizados para investigação em laboratórios. Foram processadas quatro amostras para cada liga, em períodos de tempo de 30, 60 e 120 minutos a uma velocidade de rotação de 720 rpm. Na Tabela 2 estão os parâmetros utilizados para o processamento dos pós.

Os pós processados por Moagem de Alta Energia foram compactados numa prensa manual com capacidade para 15 t/cm<sup>2</sup>. Para todas as amostras, o tempo de aplicação da carga utilizado foi de 10 minutos a uma pressão de 10 t/cm<sup>2</sup>.

Amostra	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Al	Tempo (min)
AM01/AM02/AM03/AM04	0,18	0,12	0,02	0,04	0,02	19,62	120

Tabela 2. Parâmetros das amostras para processamento do pó em gramas.

Fonte: Os autores (2019).

## 2.2 Sinterização do compactado verde

Os compactados verdes foram sinterizados em uma atmosfera controlada de argônio para evitar a oxidação a uma temperatura de patamar de 500°C por um período de 5h e taxa de aquecimento de 20°C/min. Logo, o resfriamento ocorreu no próprio forno até atingir a temperatura ambiente. A Figura 1 ilustra o ciclo de sinterização das amostras. Foram sinterizadas três amostras: AM01, AM02, AM03.

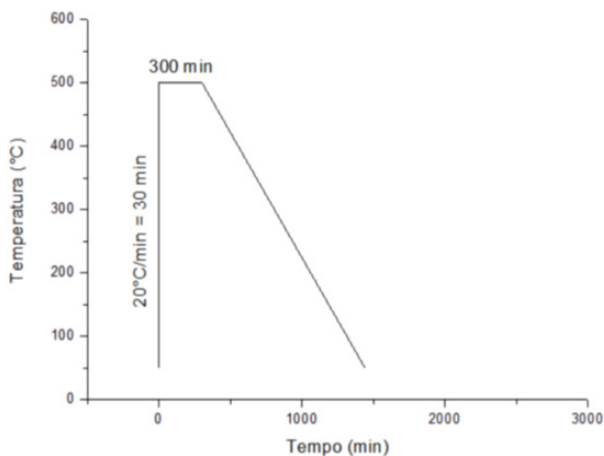


Figura 1. Ciclo de sinterização.

Fonte: Os autores (2019).

## 2.3 Preparação Metalográfica

Inicialmente foi realizado o corte ao meio das amostras, as sinterizadas em máquina de corte apropriada, e a extrudada em máquina de corte de baixa velocidade com disco abrasivo apropriado para o corte dessas amostras. Após o corte das amostras, foi realizado seu embutimento com o uso de uma resina auto-polimerizante para permitir um bom manuseio.

Em seguida, foi feito o lixamento da vista das seções das amostras a fim de eliminar vestígios de rebarbas provenientes do corte por disco abrasivo. As lixas d'água utilizadas

passaram pela sequência de Mesh de 220, 320, 400, 600 e 1200. O polimento foi feito manualmente numa politriz com o uso de pasta de diamante de 1  $\mu\text{m}$  e o ataque da superfície por ácido fluorídrico a 0,5% por 15s (COUTINHO, 1980).

## 2.4 Extrusão a quente

A extrusão foi realizada numa matriz envolta por uma manta térmica que permite manter a temperatura desejada. O compactado verde da amostra foi colocado na matriz, este conjunto foi aquecido a temperatura de 500°C e prensados em uma prensa hidráulica. Foi extrudada a amostra AM04 com tempo de sinterização de 120 minutos.

## 2.5 Análise das Partículas de Pó

As análises da distribuição e tamanho das partículas de pó foram realizadas por via úmida com a água como meio dispersante. A distribuição do tamanho de partícula é dada em termos de um gráfico de distribuição de frequência em proporção de volume numa faixa de 0,01 a 3000  $\mu\text{m}$ .

A difração de Raios-X foi realizada para caracterização microestrutural das amostras de pó processadas por Moagem de Alta Energia. Por meio desta técnica identificamos as fases presentes nos pós. A análise foi realizada em um difratômetro de Raios-X do tipo SHIMADZU, modelo XRD-7000, com radiação de Cu-K $\alpha$ , comprimento de onda  $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ , tensão de 40KV, corrente de 30mA, faixa de medição ( $2\theta$ ) de 5° a 120°, velocidade de medição de 1°/min e passo de 0,02°.

## 2.6 Micrografia e Dureza

Nas análises por MEV visualizamos o formato das partículas dos pós, a distribuição das partículas nos diversos tempos de MAE e a microestrutura da amostra extrudada. As análises químicas por EDS das amostras de pó sinterizada e extrudada, foram analisadas por um equipamento acoplado ao MEV. A análise por microscopia ótica foi realizada com um microscópio ótico da marca Zeiss, com câmera de vídeo acoplada AxioCam MRC5 e aumentos de 50x a 1000x e as imagens da amostra em aproximação de 100x, 200x e 500x. Para a microdureza, foi aplicada uma carga de 300g, com um tempo de indentação de 15s em cinco pontos aleatórios distribuídos de uma borda a outra das amostras com velocidade de aproximação entre 1,2 a 25 mm/s e realizado nas vistas superficial (S) e transversal (Ts) das amostras sinterizadas e vistas superfície transversal (T) e seção Longitudinal (L) da amostra extrudada.

# 3 | RESULTADOS

Pela observação das imagens do MEV e a análise química do EDS, as morfologias das partículas dos pós de partida possuem formas irregulares ou arredondadas e não foram encontradas impurezas na composição dos pós.

A Figura 2 apresenta as imagens dos pós utilizados na fabricação das ligas pela Microscopia eletrônica de Varredura.

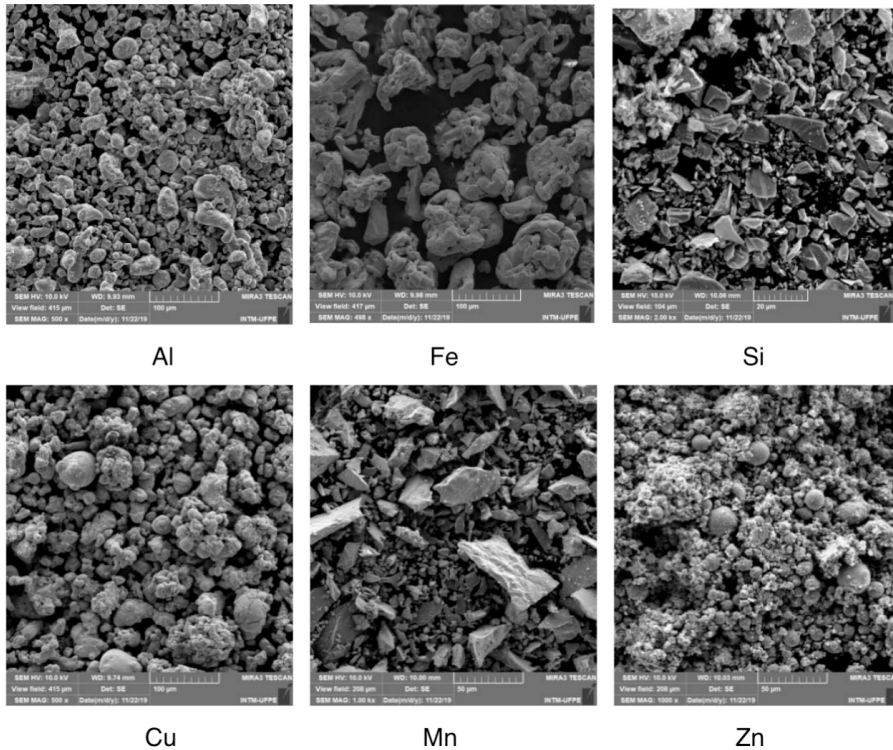


Figura 2. Pós Elementares.

Fonte: Os autores (2019).

A Figura 3 apresenta os difratogramas da liga AA8011 com os tempos de moagem de 30, 60, 120 minutos das amostras (AM01, AM02, AM03 e AM04) com as suas fases. Não houve praticamente nenhum deslocamento dos picos nas amostras.

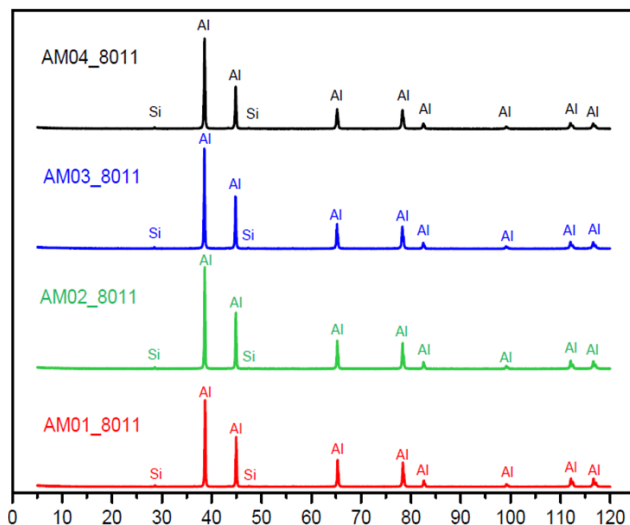


Figura 3. DRX da Liga AA8011 com tempos de moagem de 30, 60, 120 min.

Fonte: Os autores (2019).

Cunguang *et al.* (2015), ao estudar os efeitos do tamanho do pó de alumínio e microestrutura em compósitos de alumínio reforçado com nitrato de boro, observaram que durante o processo de moagem a maior energia produzida a partir da colisão constante entre as partículas e as esferas de aço, causou deformação plástica nas partículas de pó. Conforme se observa na Figura 4, esse efeito também foi verificado nos pós das ligas estudadas a partir da observação das micrografias que nos mostra pós deformados, formas irregulares e dimensões menores a cada tempo de moagem devido às maiores fraturas ocorridas. Nas Figuras 5 a 7 é apresentado os EDS com a identificação dos elementos presentes nas amostras do pó.

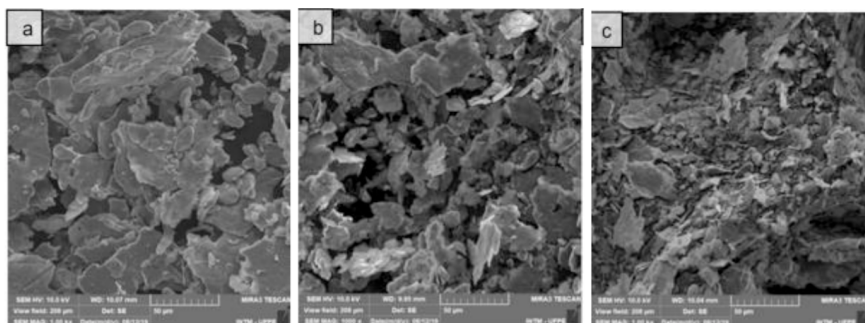


Figura 4. MEV partículas de pó com aumento de 1.00 kx de (a) AM01 (b) AM02 e (c) AM03

Fonte: Os autores (2019).

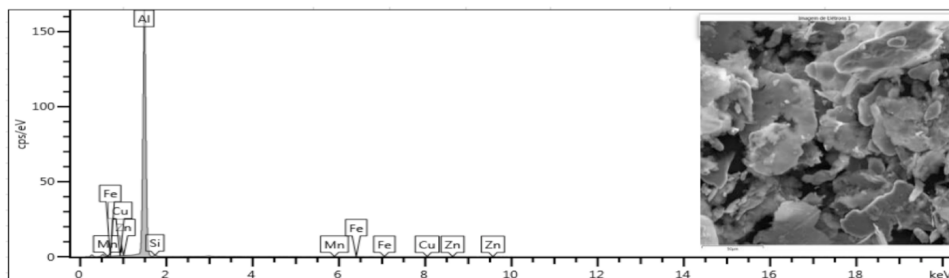


Figura 5. EDS liga AA8011 (AM01).

Fonte: Os autores (2019).

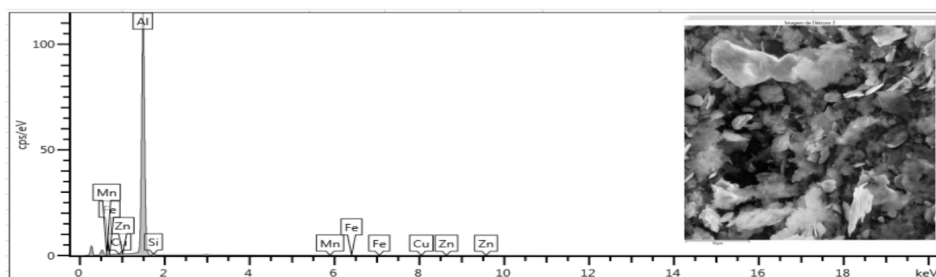


Figura 6. EDS liga AA8011 (AM02).

Fonte: Os autores (2019).

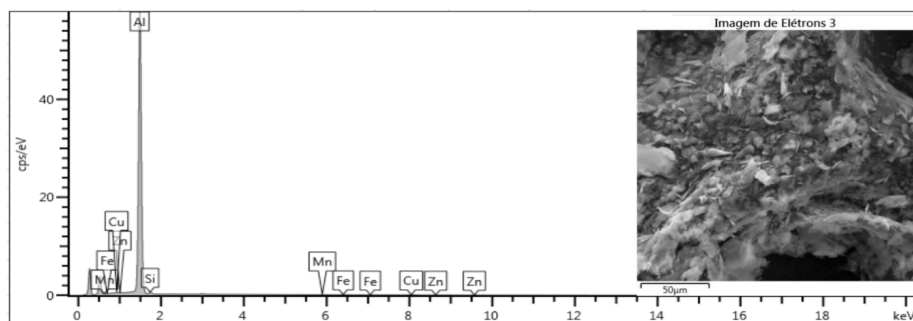


Figura 7. EDS liga AA8011 (AM03).

Fonte: Os autores (2019).

Pela observação da curva de distribuição de frequência, foi identificada uma distribuição unimodal, característica que indica que os pós podem ser utilizados para a Metalurgia do Pó. Também se observa que há um deslocamento para a esquerda o que mostra a diminuição de diâmetro da partícula dos pós que decresce a cada aumento do tempo de moagem, como pode ser confirmado pelos valores de diâmetro mediano - D50,



apresentado no Tabela 3. Essa diminuição do tamanho mediano das partículas, indica que estas ficam cada vez mais finas, demonstrando que o tempo de moagem influencia no processo.

Amostra	Tempo de moagem	D10 (µm)	D50 (µm)	D90 (µm)
AM01	30 min	20,336	57,182	122,905
AM02	60 min	8,908	26,818	62,302
AM03 AM04	120 min	5,910	20,438	53,678

Tabela 3. Distribuição das partículas de pó.  
Fonte: Os autores (2019).

A Figura 8 apresenta o resultado da MO na amostra sinterizada (AM03) da liga de alumínio AA8011, em sua seção superficial (S) e seção transversal (Ts) no tempo de moagem de 120 minutos com aumento de 200x. A Figura 9 apresenta o resultado da MO na amostra extrudada (AM04) em sua superfície transversal (T) e seção Longitudinal (L). Observando as imagens, a morfologia de ambas as amostras se apresenta deformada, com contornos de grão não definidos, a presença de porosidade nas amostras e maior homogeneização da amostra extrudada. As alterações na estrutura dos grãos ocorrem pelas sucessivas soldagens e fraturas da MAE.

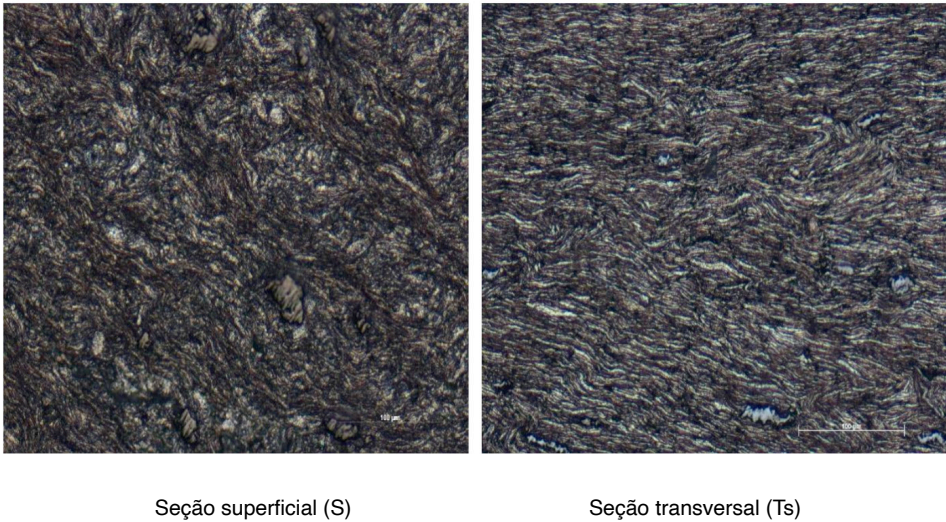
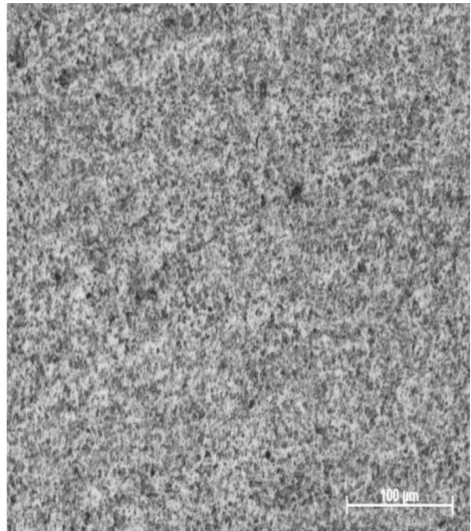


Figura 8. MO liga AA8011 com aumento de 200x da amostra sinterizada.  
Fonte: Os autores (2019).





Seção longitudinal (L)



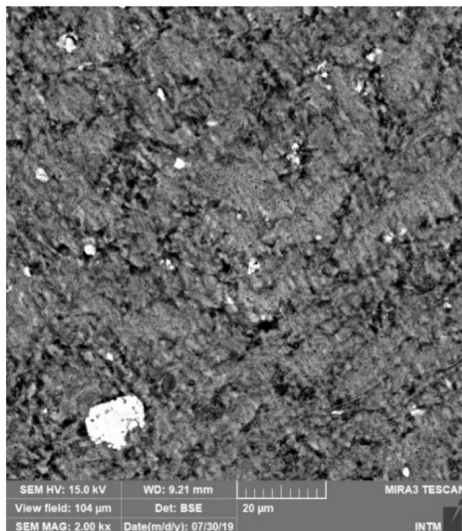
Superfície transversal (T)

Figura 9. MO liga AA8011 com aumento de 200x da amostra extrudada.

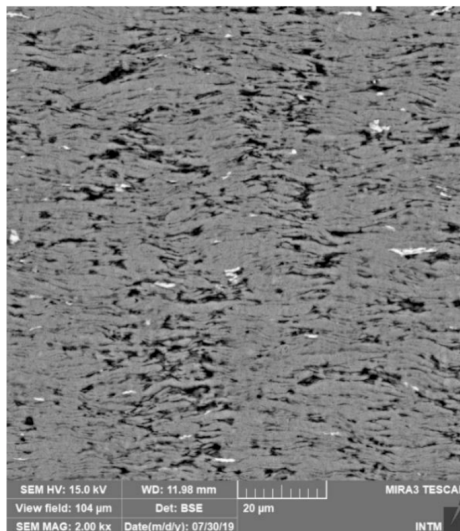
Fonte: Os autores (2019).

A Figura 10 apresenta os resultados da MEV da amostra sinterizada em suas seções superficiais (S) e transversais (Ts) no tempo de moagem de 120 minutos e aumento de 2.00kx. A Figura 11 apresenta MEV e EDS da amostra sinterizada. A Figura 12 apresenta os resultados da MEV da amostra extrudada em sua superfície transversal (T) e seção Longitudinal (L) no tempo de moagem de 120 minutos e aumento de 2.00kx. A Figura 13 apresenta MEV e EDS da amostra extrudada, cujo círculo vermelho indica os precipitados e a seta amarela a direção da extrusão.

Em nenhuma das amostras na análise da MEV e EDS apareceram elementos que não pertenciam às ligas confirmando que os pós não sofreram contaminação. Apenas apresentando precipitados de  $\text{AlFeSi}$  e  $\text{AlSi}$ , com a coloração mais clara para o precipitado ternário e mais opaca para o precipitado binário.



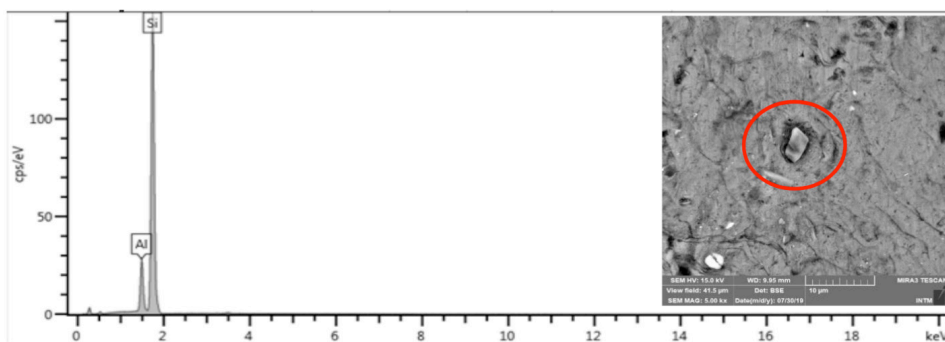
Seção Superficial (S)



Seção Transversal (Ts)

Figura 10. MEV com aumento de 2.00 kx da amostra sinterizada.

Fonte: Os autores (2019).

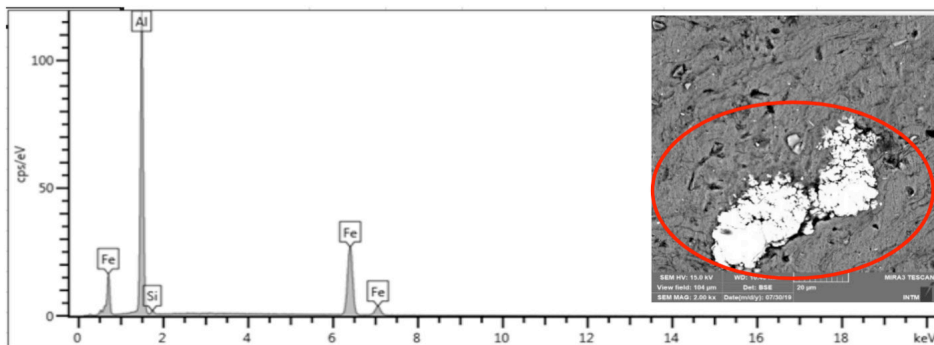


AlSi

Figura 11. MEV e EDS dos precipitados da amostra sinterizada.

Fonte: Os autores (2019).

(continuação)

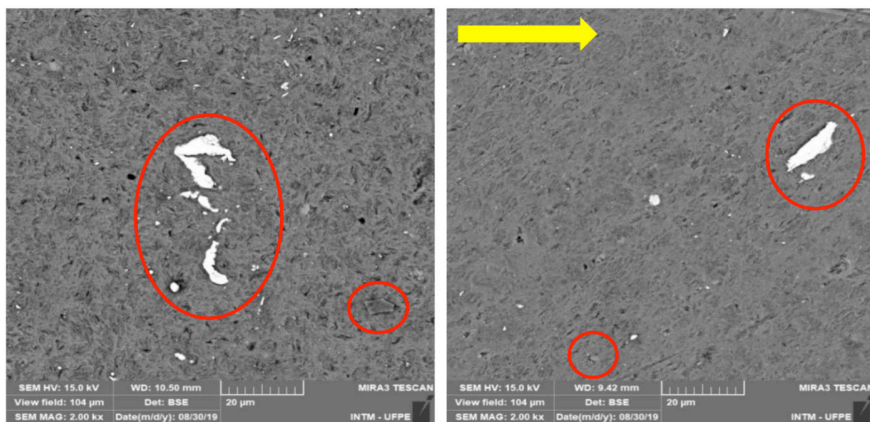


AlFeSi

Figura 11. MEV e EDS dos precipitados da amostra sinterizada.

Fonte: Os autores (2019).

Conforme Ferguson e Roberts (1998), a extrusão produz uma melhor densificação no material e confere uma distribuição longitudinal e transversal uniforme da fase dispersa. A extrusão é o principal método de densificação na produção de metais através da MAE baseada na MP como meio de produzir uma distribuição uniforme das fases do material.



Superfície transversal (T)

Seção longitudinal (L)

Figura 12. MEV com aumento de 2.00 kx amostra extrudada.

Fonte: Os autores (2019).

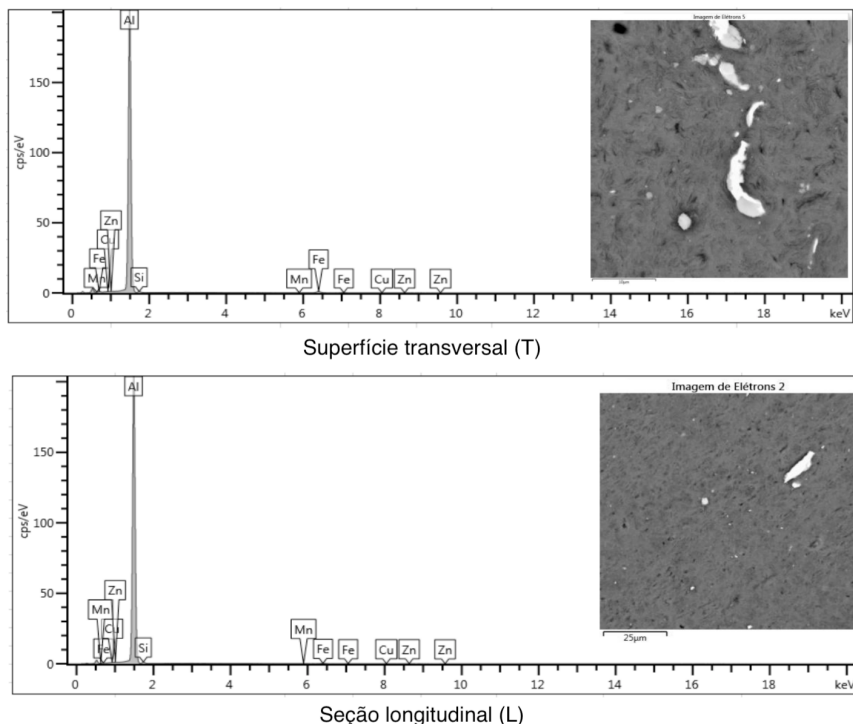


Figura 13. MEV e EDS dos precipitados da amostra extrudada.

Fonte: Os autores (2019).

A Tabela 4 apresenta a média e o desvio padrão para a microdureza obtido das amostras da liga AA8011 sinterizada (AM03) em suas seções superficiais (S) e transversais (Ts), e extrudada (AM04) nos cortes das seções longitudinal (L) e superfície transversal (T).

Liga AA8011	AM03 (S)	AM03 (Ts)	AM04 (L)	AM04 (T)
Média (HV)	73,80	55,68	93,22	90,10
Desvio Padrão	14,73	6,53	4,74	1,38

Tabela 4. Médias e desvios padrões dos valores de microdureza Vickers das amostras sinterizada e extrudada.

Fonte: Os autores (2019).

Segundo Conforme Ferguson e Roberts (1998), a fina camada protetora de óxido (alumina –  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) que envolve as partículas de pó é facilmente quebrada na extrusão. A microdureza da amostra extrudada para um tempo de moagem de 120 minutos obteve valores maiores que os da amostra sinterizada. Isso se deve ao fato de que a camada de

alumina poder ser quebrada na extrusão, o que provoca uma melhoria na densificação do material. A figura 14 apresenta as microdureza das amostras.

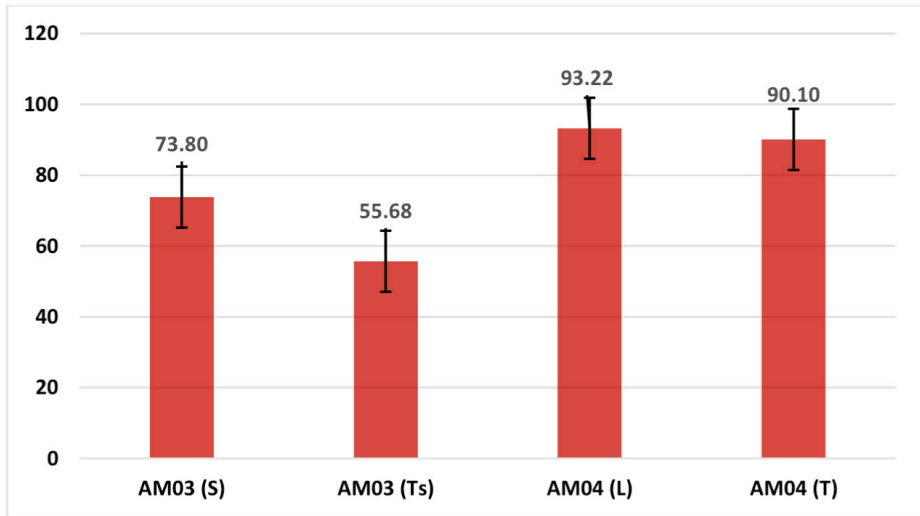


Figura 14. Microdureza da amostra sinterizada (AM03) e extrudada (AM04).

Fonte: Os autores (2019).

## 4 | CONCLUSÕES

Os achados experimentais sobre o desenvolvimento apresentaram a morfologia dos pós elementares com formas irregulares ou arredondadas. Por meio do ensaio de granulometria, verificou-se a diminuição do tamanho das partículas dos pós à medida que o tempo de moagem aumenta. Observou-se nas imagens do MO e MEV da amostra sinterizada e da extrudada, uma estrutura deformada em que foi identificado pela análise dos EDS, precipitado ternário ( $\text{AlFeSi}$ ) e binário ( $\text{AlSi}$ ). Na imagem da seção transversal da amostra sinterizada e seção longitudinal da amostra extrudada fica evidenciada a formação de lamelas perpendiculares à direção da compactação. A análise das imagens do MO e principalmente do MEV da amostra sinterizada mostra uma porosidade maior e uma densificação menor que a porosidade e densificação da amostra extrudada. A amostra extrudada apresenta melhor homogeneização que a sinterizada o que melhora a resistência dos materiais.

## REFERÊNCIAS

ASM Handbook. **Properties and Selection: Non Ferrous Alloys and Special-Purpose Materials**, Vol 2, 1990

BARBOSA, CÁSSIO. **Metais não Ferrosos e suas Ligas: Microestrutura, Propriedades e Aplicações**. Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais Ltda, 2014.

CHIAVERINI, VICENTE. **Tecnologia mecânica: processo de fabricação e tratamento**. 2. ed. São Paulo: MacGraw-Hill, 1986. v. 2.

COUTINHO, TELMO DE AZEVEDO. **Metalografia de Não-Ferrosos**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1980.

CUNGUANG CHEN; LEICHEN GUO; JI LUO; JUNJIE HAO; ZHIMENG GUO; VOLINSK, ALEX A. **Aluminum powder size and microstructure effects on properties of boron nitride reinforced aluminum matrix composites fabricated by semi-solid powder metallurgy**. Materials Science & Engineering A, 646, pp. 306–314, 2015.

FERGUSON, B. L.; ROBERTS, P. R. **Extrusion of Metal Powders**. In: ASM Handbook Committee, Vol. 7, Powder Metal Technologies, and Applications, 1998.

MEIGNAMOORTHY, M.; RAVICHANDRAW, A. **Synthesis, properties and microstructure of sintered and hot extruded boron carbide reinforced AA8079 (Al-Cu-Fe-Si-Zn) matrix composites**. Materials Research Express, 2018.

MEIGNAMOORTHY, M.; RAVICHANDRAW, A.; ELMARIUNG, A. **Effect of Sintering Temperature on the Microstructure and Forming Behavior of AA8079 (Al-Cu-Fe-Si-Zn)**. Advances in Manufacturing Technology, pp. 607 – 613, 2019.

TORRALBA, J.M., COSTA, C.E., VELASCO, F. P/M **Aluminum Matrix Composites: Na Overview**. Journal of Materials Processing Technology, pp. 203 – 206, 2003.

SHACKELFORD, JAMES F. **Ciência dos Materiais**. 6ª edição, São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.



## METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DE CUSTOS ASSOCIADOS À APLICAÇÃO DE SOLDAGEM EM TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS

Data de aceite: 01/06/2021

Data de submissão: 07/03/2021

### **Wagner Gutemberg Cavalcanti da Silva**

Centro Universitário Estácio do Recife,  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Recife-PE  
<http://lattes.cnpq.br/7634143251288039>

### **Felipe Leandro dos Santos**

Centro Universitário Estácio do Recife,  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Recife-PE  
<http://lattes.cnpq.br/3150169145078055>

### **Helen Rodrigues Araújo**

Universidade Federal de Pernambuco,  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Recife-PE  
<http://lattes.cnpq.br/0750160286058633>

### **Marcio Rolemberg Freire**

Universidade Federal de Pernambuco,  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Recife-PE  
<http://lattes.cnpq.br/9402507325665466>

### **Moisés Euclides da Silva Junior**

Centro Universitário Estácio do Recife,  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Recife-PE  
<http://lattes.cnpq.br/9524894169629954>

**RESUMO:** Com o mundo cada vez mais globalizado e o mercado econômico cada vez mais competitivo, torna-se necessário que as empresas calculem de forma mais rápida e precisa o custo e, consequentemente, o lucro associado aos seus produtos e serviços. Apresentar preços superestimados diminuem a competitividade das empresas, mas, em contrapartida, valores abaixo do custo de produção podem representar prejuízos. Neste contexto, faz-se necessário o cálculo de forma correta e precisa dos custos atrelados aos produtos e serviços ofertados. O presente estudo visa apresentar uma metodologia dinâmica que permite calcular o custo total associado à aplicação dos principais processos de soldagem em tubulações industriais. Tal método é construído de forma a tornar disponível uma ferramenta de fácil interação e interpretação com o objetivo de quantificar os custos associados à aplicação da soldagem. Foi constatado que para a determinação dos custos totais relacionados à soldagem, existem muitos fatores a serem considerados além dos triviais tais como: geometria da junta a ser soldada, custos associados à mão de obra qualificada, concomitância de aplicação de processos numa mesma junta. A eficiência e facilidade de operação da ferramenta são apresentadas em um estudo de caso realizado durante soldagem de tubulações de um terminal aquaviário.

**PALAVRAS-CHAVE:** Custos, Soldagem, Tubulações Industriais.

## METHODOLOGY FOR ESTIMATING COSTS ASSOCIATED WITH THE APPLICATION OF WELDING IN INDUSTRIAL PIPES

**ABSTRACT:** With the world increasingly globalized and the economic market increasingly competitive, it is necessary for companies to calculate more quickly and accurately the cost and, consequently, the profit associated with their products and services. Presenting overestimated prices decreases the competitiveness of companies and values below the cost of production can represent losses. In this context, it is necessary to calculate correctly and accurately the costs linked to the products and services offered. The present study aims to present a dynamic methodology that allows to calculate the total cost associated with the application of welding processes in industrial pipes. This method was built to make an easy tool for quantifying the costs associated with the application of welding. It was found that for the determination of the total costs related to welding, there are many factors to be considered besides the trivial ones such as: geometry of the joint, costs associated with qualified labor, concomitance of applying processes in the same joint. The efficiency and ease of the tool are presented in a case study performed on the pipes of a waterway terminal.

**KEYWORDS:** Costs, Welding, Industrial Piping.

### 1 | INTRODUÇÃO

Hoje a soldagem é um dos processos de fabricação e união entre metais mais importantes e utilizados nos ramos: metalúrgicos, petróleo e gás, construção naval, ferroviário e estrutural. Por isso há uma importância muito grande em quantificar o custo dos processos de soldagem, pois uma avaliação incorreta dos custos de soldagem poderá comprometer a competitividade da empresa ou gerar prejuízos econômicos. O conhecimento desses valores e sua rápida obtenção são de grande importância, uma vez que o mesmo poderá ser utilizado para determinar o processo de soldagem a utilizar, no processo de elaboração de orçamentos para participação em licitações, avaliar os custos orçados comparados aos custos reais, além de reconhecer a lucratividade.

Visando reconhecer a importância de uma estimativa correta do custo dos processos de soldagem mais utilizados na indústria, esse estudo objetiva apresentar um método, incluindo equações e variáveis para obtenção dos custos relacionados à aplicação dos principais processos de soldagem em tubulações industriais, como também demonstrar uma forma dinâmica de tornar os cálculos mais rápidos e de facilitar o tratamento dos dados, dessa forma, possibilitando a evidência das oportunidades em tornar as aplicações mais econômicas. Desta forma, esta metodologia pode ser de grande utilidade para os profissionais relacionados aos setores de Métodos e Processos, Orçamentos e PCP (Planejamento e Controle da Produção).



## 21 BASE DE CÁLCULOS PARA OBTENÇÃO DOS CUSTOS ASSOCIADOS À SOLDAGEM

Para determinação dos custos relacionados a aplicações de soldagem deve-se considerar um universo de variáveis que compreende desde a escolha do processo, do treinamento adequado ao soldador, passando pelas etapas de definição da junta, dos equipamentos necessários, até a simulação da execução (WAINER, BRANDI e MELLO, 2004). Os autores Marques, Modenesi e Bracarense (2009) ressaltam que o Custo de Mão de Obra, quando considerado junto aos custos fixos da empresa, torna-se o custo de maior valor a ser considerado no processo de obtenção dos custos e a soma desta parcela ao custo relativo aos consumíveis, representa cerca de 93% do custo total associado à soldagem. Devido ao fato destas duas parcelas combinadas representarem um montante significativo dos custos relativos à aplicação deste processo de fabricação, muitas vezes são as únicas a serem consideradas durante a quantificação dos custos de soldagem, diferentemente da metodologia proposta neste trabalho.

### 2.1 Custo dos consumíveis

O custo total dos consumíveis ( $C_{\text{total},c}$ ) é dado pelo somatório do custo do metal de adição ( $C_{m,a}$ ), do custo do gás de proteção ( $C_{\text{gás}}$ ) e do custo do fluxo ( $C_{\text{fluxo}}$ ), conforme a demanda de cada aplicação/processo de soldagem (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).

O custo do metal de adição, como esclarecem Wainer, Brandi e Mello (2004), pode ser determinado por meio da massa do material depositado ( $m_{m,d}$ ) necessário para preencher o chanfro, os reforços da solda e as possíveis reposições devido a trabalhos de goivagem. As equações utilizadas para determinação da área da seção transversal de uma junta de solda, de acordo as geometrias dos principais tipos de chanfros, consideram variáveis como a espessura da do metal de base ( $e$ ), a abertura da raiz ( $d$ ), o ângulo do chanfro ( $\theta$ ) e a o nariz da junta ( $h$ ) (ARAÚJO, 2018).

Para determinação da massa de metal depositado ( $m_{m,d}$ ), é necessário conhecer além da área da seção transversal ( $A_s$ ), o comprimento da junta de solda ( $L$ ) e a massa específica ( $\rho$ ) do material aplicado (Equação 1).

$$m_{m,d} = A_s \times L \times \rho \quad \text{Equação 1}$$

Araújo (2018) ainda acrescenta que para determinação desta parcela do custo deve ser considerado a eficiência de deposição ( $E_{\text{dep}}$ ) associada ao processo aplicado (Tabela 1), que pode ser definido como a porcentagem do metal de adição que efetivamente se transformou em junta soldada, devido as perdas oriundas de partes do consumível tais como: revestimento, pontas, respingos, entre outros fatores.

PROCESSO	METAL DE ADIÇÃO	EFICIÊNCIA DEPOSIÇÃO	VALOR MÉDIO
<b>SMAW</b>	Eletrodo Revestido	0,55 a 0,75	0,65
<b>GTAW</b>	Vareta	0,90 a 0,94	0,92
<b>SAW</b>	Arame Sólido	0,95 a 0,99	0,97
<b>GMAW</b>	Arame Sólido	0,90 a 0,96	0,93
<b>FCAW-GS</b>	Arame Tubular	0,84 a 0,90	0,87
<b>FCAW-SS</b>	Arame Tubular	0,80 a 0,86	0,83

Tabela 1. Eficiência de deposição típica para alguns processos de soldagem.

Fonte: Adaptado de Brito e Paranhos (2005).

Conhecendo tais variáveis é possível determinar o custo associado ao metal de adição conforme descreve a Equação 2.

$$C_{m,a} = \frac{m_{m,d}}{E_{dep}} \quad \text{Equação 2}$$

A aplicação de processos que utilizam gás de proteção como os processos MIG (Metal Inert Gas), Arame Tubular, TIG (Tungsten Inert Gas) faz-se necessária a inserção desta parcela de custo no orçamento (MACHADO, 1996), conforme cálculo estabelecido na Equação 3.

$$C_{gás} = CG \times Q \times t \quad \text{Equação 3}$$

Os parâmetros CG refere-se ao custo unitário do gás (R\$/litros), que varia de acordo ao fornecedor, e o Q é a vazão do gás (litros/min) apurada durante a aplicação.

O tempo real de soldagem (t), é dado em minutos, que o soldador permanece soldando efetivamente, no caso, equivalente ao tempo de arco aberto. Expresso pela relação apresentada na Equação 4.

$$t = \frac{m_{m,d}}{T_{dep}} \quad \text{Equação 4}$$

A taxa de deposição ( $T_{dep}$ ), é definida como parâmetro que considera a produtividade do processo de soldagem, a qualificação do soldador e a posição da soldagem a ser realizada, e pode ser determinada pela massa de metal depositado por hora, obtido muitas vezes através de experimentos feito por fabricantes e estes valores geralmente são descritos em seus catálogos. Na Tabela 2 estão descritos alguns valores típicos.

TAXA DE DEPOSIÇÃO	
Processo de Soldagem	(kg/h)
Elétrodo Revestido	1,0 a 3,0
MIG – MAG	2,0 a 6,0
Arame Tubular	3,0 a 8,0
Arco Submerso (1 arame)	5,0 a 12,0
Twin-Arc (Arco Submerso ou MIG-MAG)	10,0 a 25,0
Tandem-Arc (Arco Submerso ou MIG-MAG)	12,0 a 30,0

Tabela 2. Taxa de deposição típica para os principais processos de soldagem a arco elétrico.

Fonte: Adaptado de Brito e Paranhos (2005).

Durante a aplicação de processos de soldagem como Arco Submerso, os quais utilizam um fluxo granular que traz uma série de benefícios para a junta soldada, faz-se necessária a quantificação do custo associado a este material (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009). A Equação 5 apresenta uma forma de calcular esta parcela de custo.

$$C_{Fluxo} = m_{m.g} \times CF \times R_{Fluxo} \quad \text{Equação 5}$$

Onde CF é o custo do fluxo (R\$/kg) e  $R_{Fluxo}$  é o rendimento percentual do fluxo, o qual pode ser determinado pela razão entre a quantidade de fluxo consumida em kg e a quantidade de metal de adição depositado, podendo ser, também, um valor definido pelo fornecedor.

A partir do somatório destas parcelas, conforme as condições de soldagem aplicadas, é possível determinar o Custo Total dos Consumíveis ( $C_{total,c}$ ), conforme Equação 6.

$$C_{total,c} = C_{m.a} + C_{Gás} + C_{Fluxo} \quad \text{Equação 6}$$

## 2.2 Custo de energia elétrica

Para a aplicação dos processos de soldagem por fusão a arco elétrico, faz-se necessária o fornecimento de energia elétrica para alimentação da fonte, por isso esta parcela de custo, também deve ser considerado na estimativa do orçamento do serviço. Para determinação do custo de energia elétrica a partir dos valores de potência de saída da fonte de soldagem ( $P_s$  em kW), tempo real de soldagem (t em h), custo unitário da energia elétrica (W em R\$/kW.h) e rendimento do equipamento ( $\eta$  em %), conforme apresentado na Equação 7.

$$C_{E,E} = \frac{P_s \times t \times w}{\eta}$$
Equação 7

Conforme ressaltam Marques, Modenesi e Bracarense (2009), o rendimento do equipamento é fornecido nas informações técnicas das fontes de soldagem. Afirmam ainda que a potência de saída ( $P_s$ ) é dada pelo produto entre a tensão (V) e a corrente de soldagem (A). A Tabela 3 apresenta as eficiências características dos diferentes tipos de equipamentos de soldagem.

Equipamento	Eficiência (%)
<b>Transformador</b>	80
<b>Retificador Trifásico</b>	75 ( $\leq 400$ A)
	80 ( $> 400$ A)
<b>Retificador monofásico</b>	75
<b>Gerador</b>	65

Tabela 3. Eficiência dos equipamentos de soldagem.

Fonte: Adaptado de Wainer, Brandi e Mello (2004).

## 2.3 Custo de mão de obra

Esta etapa é de extrema importância, pois é considerada como um dos maiores custos associados a aplicação de um processo de soldagem. Sua determinação considera os valores de salário, encargos sociais e custos fixos da empresa. Estes valores, geralmente, podem ser solicitados ao Departamento Pessoal da empresa e servem para determinação do custo hora-homem (HH). A Equação 8 apresenta o cálculo necessário para obtenção desta parcela de custo.

$$HH = \frac{\text{salário} + \text{encargos sociais} + \text{custos fixos}}{n^{\circ} \text{ de horas trabalhadas no mês}}$$
Equação 8

Para determinar o custo de mão de obra alguns fatores são fundamentais, tais como: tempo total de soldagem ( $t_{\text{total, sol}}$ ) e suas variáveis, tais quais a massa de metal depositado ( $m_{m,d}$ ), o fator de operação ( $F_{op}$ ) característico do processo aplicado e a Taxa de Deposição ( $T_{dep}$ ) (MACHADO, 1996).

Wainer, Brandi e Mello (2004) explicam que o  $F_{op}$  é o tempo efetivo de soldagem associado ao soldador/operador de soldagem, neste caso, é considerado apenas o percentual de tempo de arco aberto. Ainda neste contexto, Machado (1996) cita alguns deles em relação ao tipo de processo (Tabela 4).

Tipo de Soldagem	Fator de Operação (%)
Manual	10 a 30
Manual	10 a 45
Automática	40 a 70
Semi-Automática	20 a 45
Semi-Automática	20 a 45

Tabela 4. Valores típicos para o fator de operação.

Fonte: Adaptado de Machado (1996).

Por meio dos valores de fator de operação, taxa de deposição e a massa do metal depositado, é possível determinar o tempo total de soldagem ( $t_{total, sol}$ ), conforme Equação 9.

$$t_{total, sol} = \frac{m_{m,d}}{F_{op} \times T_{dep}} \quad \text{Equação 9}$$

Após a determinação das parcelas HH e  $t_{total, sol}$ , pode-se, então, determinar o Custo de Mão de Obra ( $C_{m,o}$ ), expresso pela Equação 10.

$$C_{m,o} = HH \times T_{total, sol} \quad \text{Equação 10}$$

## 2.4 Custo da manutenção do equipamento de soldagem

Este custo associado à manutenção pode ser avaliado de forma individual para cada equipamento ou de modo geral quando for necessário utilizar o custo de todos os equipamentos em conjunto. O custo médio de manutenção ( $C_{m,m}$ ) refere-se a razão entre o valor gasto com peças de reposição e a mão de obra utilizada sobre um determinado período para este fim. O tempo de operação do equipamento ( $t_{op}$ ) é a quantidade de horas que o equipamento permaneceu em produção, considerando o mesmo intervalo do  $C_{m,m}$ . A Equação 11 apresenta a base de cálculo para determinação desta parcela de custo.

$$C_{m,e} = \frac{C_{m,m}}{t_{op}} \quad \text{Equação 11}$$

## 2.5 Custo de depreciação do equipamento

Todo equipamento sofre desgaste ao longo de sua vida útil, por isso deve-se levar em consideração fatores como a desvalorização do mesmo, bem como o tempo necessário para reposição. Com isso, é importante considerar que esta despesa também influencia no custo final de manufatura (WAINER, BRANDI e MELLO, 2004). Por meio da relação entre o valor de aquisição do equipamento ( $V_i$ ), o valor residual do mesmo ( $V_r$ ) e o tempo de vida útil deste equipamento ( $t_{v,util}$ ), torna-se possível determinar o custo de depreciação do equipamento, conforme apresenta a Equação 12.

$$C_{dep} = \frac{V_i - V_r}{t_{v, \text{útil}}} \quad \text{Equação 12}$$

Segundo Marques, Mondenesi e Bracarense (2009) este valor residual está relacionado ao desgaste e obsolescência dos equipamentos e pode variar conforme a taxa de uso. Usando como fonte de dados a Receita Federal, máquinas e equipamento possui uma taxa máxima anual de depreciação associada de 10% e vida útil (máxima) considerada de 10 anos.

## 2.6 Custo de outros materiais de consumo

Outros materiais de consumo podem ser considerados durante a estimativa de custos associados à aplicação de soldagem, tais como: EPIs, anti-respingos, bicos de contato, bocais, entre outros. Conforme relato de Wainer, Brandi e Mello (2004), a determinação desta parcela de custo ( $C_{\text{outros}}$ ) pode ser semelhante ao cálculo realizado para o custo de manutenção ( $C_{m,e}$ ) (Equação 13). O a ser considerado nesta etapa é o custo médio de troca ( $C_{m,troca}$ ), valor referente ao quanto é gasto com estes materiais de consumo por um certo intervalo de tempo. Uma maneira empregada para identificação deste custo pode ser através do histórico de troca ou compra dos mesmos na empresa. Outra opção, pode ser caracterizado por determinar o preço dos mesmos e dividir pelo tempo médio de troca de cada um deles, conforme indicação dos fabricantes e critérios normativos, tornando possível a obtenção do custo médio de troca de cada material.

$$C_{\text{outros}} = \frac{C_{m,troca}}{t_{op}} \quad \text{Equação 13}$$

## 2.7 Custo total da soldagem

O Custo Total de Soldagem ( $C_{\text{total,sol}}$ ) é o somatório de todos os custos abordados anteriormente (Equação 14). Vale ressaltar que esta soma deve contemplar apenas os custos inerentes a aplicação de processos de soldagem.

$$C_{\text{total,sol}} = C_{\text{total,c}} + C_{E,E} + C_{m,o} + C_{m,e} + C_{dep} + C_{\text{outros}} \quad \text{Equação 14}$$

Wainer, Brandi e Mello (2004) ressalta que quando não for viável calcular os custos de manutenção de equipamentos ( $C_{m,e}$ ), de depreciação ( $C_{dep}$ ) e o de outros materiais de consumo ( $C_{\text{outros}}$ ), um fator de correção poderá ser acrescentado ao Custo Total de Soldagem, com o intuito de tornar a estimativa mais precisa. Este fator varia de acordo com o processo de soldagem e está descrito na Tabela 5. A Equação 15 apresenta o fator de correção aplicado.

Processo	Fator
Eletrodo revestido	1,02
Eletrodo nu sob proteção	1,09
Eletrodo tubular com proteção	1,09
Eletrodo tubular sem proteção	1,04
Arco submerso	1,05

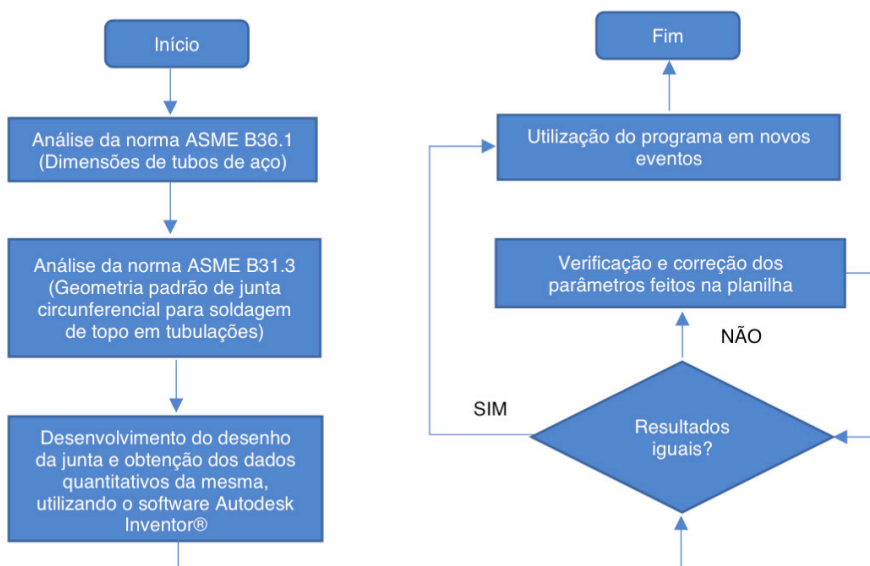
Tabela 5. Fator de correção a ser aplicado sobre o Custo Total de Soldagem.

Fonte: Wainer, Brandi e Mello (2004).

$$C_{total,sol} = (C_{total,c} + C_{E,E} + C_{m,o}) \times F_{correção} \quad \text{Equação 15}$$

### 3 | METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DE CUSTOS ASSOCIADOS À APLICAÇÃO DE SOLDAGEM EM TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS

A metodologia proposta contempla a criação de uma planilha interativa, com o intuito de facilitar os cálculos de custos associados à soldagem de tubulações industriais, facilitando a escolha do processo mais econômico a ser utilizado e permite maior agilidade na etapa de construção do orçamento. Através do fluxograma exposto na Figura 1, apresenta as etapas necessárias para a obtenção dos resultados.



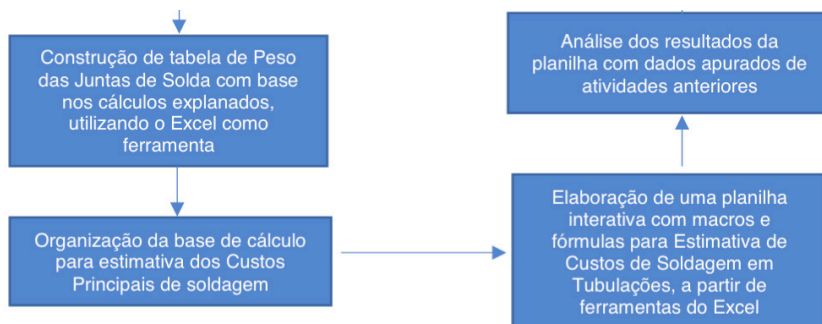


Figura 1. Fluxograma da construção de método para determinação dos Custos dos Processos de Soldagem em Tubulações.

Fonte: Própria (2020).

De posse dos valores de volume e massa obtidos a partir da utilização da ferramenta para dimensionamento, o software de engenharia Autodesk Inventor Professional®, no qual a alimentação dos dados foi realizada a partir dos critérios estabelecidos pelas normas ASME B36.1 (2015) e ASME B31.3 (2014) códigos relacionados a tubulações de processos, tornando possível reconhecer os valores de volume e massa referente a cada diâmetro e espessura da tubulação.

A partir destas informações coletadas foi criado um banco de dados e, na sequência, elaborado uma Tabela de Peso de Juntas Circunferenciais.

Para os cálculos do Custo em Soldagem esta massa será equivalente a massa de metal depositado ( $m_{m,d}$ ), onde ela será usada para calcular o Custo do metal de adição ( $C_{m,a}$ ), Custo do fluxo ( $C_{fluxo}$ ), entre outros abordados.

Após a construção da tabela e organização da memória de cálculos do método, incluindo as equações e variáveis relativas ao Cálculo dos Custos de Soldagem, foi elaborada a planilha interativa na qual foram incluídos:

- Banco de dados com informações referentes a tubulações de aço, contendo diâmetro, espessura e nomenclatura. Estas informações podem ser usadas para seleção das juntas pelo usuário;
- Tabela de Peso de Juntas Circunferências, utilizada como massa de metal depositado;
- Alimentação da planilha com as equações para o cálculo dos custos de: Consumíveis; Energia Elétrica; Mão de Obra; Manutenção do Equipamento; Depreciação do Equipamento; Outros Materiais de Consumo.

Após conclusão das etapas anteriores, a planilha foi separada em três ambientes. A tela inicial contendo as informações do título da planilha, geometria de referência da junta, normas de referências, bibliografias utilizadas, e botões interativos para que o usuário



possa se deslocar pelos ambientes da planilha; a Planilha de Descrições e Resultados onde através das entradas de informações de diâmetro, espessura e quantidade de juntas, são gerados todos os dados quantitativos e custos envolvidos diretamente ao processo de soldagem, com o objetivo de obter um layout o mais simples possível e uma melhor interação com o usuário, esta aba da planilha foi organizada em Descrição, Quantidade de metal depositado, Processo utilizado para a solda de raiz, Processo usado para a soldagem de enchimento / acabamento, Custo total por diâmetro e o Custo total do processo; e o último ambiente descrito como Configuração dos Custos / Parâmetros de Soldagem, desenvolvido para a configuração dos parâmetros necessários para todos os cálculos atrelados aos custos em soldagem, além das equações para a execução dos cálculos este ambiente ainda contempla um código VBA (Visual Basic para Aplicativos) composto, onde é realizada a seleção do processo de soldagem da raiz e do acabamento / enchimento, caracterizando o dinamismo do método, pois os dados podem ser alterados automaticamente na Planilha de Descrição e Resultados.

### 3.1 Estudo de caso aplicado em tubulações de um terminal aquaviário

Este estudo de caso trata-se de um orçamento de prestação de serviço de aplicação de soldagem em tubulação de um terminal aquaviário de armazenamento e distribuição de diesel, gasolina, petróleo e álcool, situado em Maceió – AL. O serviço de soldagem foi realizado por uma empresa metalúrgica de médio porte, especializada em fabricação de equipamentos estáticos (vasos de pressão, estruturas metálicas, tubulações), que fica localizada em Escada – PE. A prestação de serviço tinha como objetivo final, a fabricação de trechos de tubulações (spools) em aço, cuja proposta de orçamento foi elaborada a partir do fornecimento de um escopo de trabalho, contendo os isométricos de tubulação para análise e proposta de prestação de serviço pela metalúrgica.

Os desenhos isométricos de tubulação foram repassados para os setores técnicos com a missão de realizar uma análise crítica de possíveis divergências, descrever e quantificar os tipos de juntas de solda integrantes do contrato. A Tabela 6 apresenta o resumo das juntas soldadas que faziam parte do contrato.

Lista de Juntas Integrantes do Contrato			
Descrição	Quantidade de juntas	Processo de soldagem da RAIZ	Processo de Soldagem do Enchimento / Acabamento
DN 1" - SCH 80 (ASME B36.1)	53	GTAW - Vareta ER70S-3	FCAW - Arame E71T-1C
DN 1.1/2"-SCH 80(ASME B36.1)	47	GTAW - Vareta ER70S-3	FCAW - Arame E71T-1C
DN 2" - SCH 160 (ASME B36.1)	41	GTAW - Vareta ER70S-3	FCAW - Arame E71T-1C
DN 3" - SCH 80 (ASME B36.1)	38	GTAW - Vareta ER70S-3	FCAW - Arame E71T-1C
DN 3" - SCH 160 (ASME B36.1)	56	GTAW - Vareta ER70S-3	FCAW - Arame E71T-1C

<b>DN 4" - SCH 120 (ASME B36.1)</b>	74	GTAW - Vareta ER70S-3	FCAW - Arame E71T-1C
<b>DN 6" - SCH 120 (ASME B36.1)</b>	28	GTAW - Vareta ER70S-3	FCAW - Arame E71T-1C
<b>DN 6" - SCH 160 (ASME B36.1)</b>	29	GTAW - Vareta ER70S-3	FCAW - Arame E71T-1C
<b>DN 8" - SCH 80 (ASME B36.1)</b>	15	GTAW - Vareta ER70S-3	FCAW - Arame E71T-1C
<b>DN 10" - SCH 80 (ASME B36.1)</b>	22	GTAW - Vareta ER70S-3	FCAW - Arame E71T-1C
<b>DN 12" - SCH 80 (ASME B36.1)</b>	25	GTAW - Vareta ER70S-3	FCAW - Arame E71T-1C
<b>DN 14" - SCH 40 (ASME B36.1)</b>	27	GTAW - Vareta ER70S-3	FCAW - Arame E71T-1C
<b>DN 16" - SCH 40 (ASME B36.1)</b>	18	GTAW - Vareta ER70S-3	FCAW - Arame E71T-1C
<b>DN 18" - SCH 40 (ASME B36.1)</b>	7	GTAW - Vareta ER70S-3	FCAW - Arame E71T-1C
<b>DN 20" - SCH 40 (ASME B36.1)</b>	11	GTAW - Vareta ER70S-3	FCAW - Arame E71T-1C

Tabela 6. Resumo das juntas a serem soldadas.

Fonte: Própria (2020).

Com base nas informações da Tabela 8, tornou possível quantificar os custos associados diretamente aos processos de soldagem no qual seriam utilizados. A partir desta definição, estes quantitativos foram alimentados na Planilha de Custos em Tubulações, com o intuito de reconhecer os custos relacionado à aplicação do processo de forma mais rápida e simples. Através de informações fornecidas pelos setores de Compras e Recursos Humanos, foi possível obter os valores pertinentes ao processo, sendo eles: de mão de obra (incluindo encargos); custos unitários de energia elétrica e metal de adição.

Os parâmetros específicos, tais como vazão do gás, eficiências do metal de adição e da fonte soldagem, corrente e tensão do equipamento e taxa de deposição, foram obtidos por meio dos manuais e catálogos de fabricantes.

Tanto os parâmetros de custo, quanto as informações técnicas, foram alimentados na aba de Configurações de Custo / Parâmetros de Soldagem da planilha/método. Para um melhor entendimento do procedimento de alimentação dos dados, a Figura 3 (Apêndice I) mostra a interface inicial desta etapa de configurações com as informações incluídas. Após concluídas as configurações, foram acrescentados na Descrição e Resultados os dados de diâmetro, espessura e quantidade, apresentados na Figura 4 (Apêndice II). Assim tornou-se possível evidenciar os custos do contrato relacionados ao processo de soldagem. Vale ressaltar que os custos encontrados, não representa o preço final do contrato, e sim, apenas os valores relacionados aos serviços de soldagem.

Cabe destacar que, uma vez aplicado, esta metodologia poderá ser utilizada por novas demandas sem necessidade de muitas modificações. Além disso, a planilha torna o orçamento muito mais rápido e preciso, além de permitir realizar uma análise comparativa sobre qual o processo de soldagem tem o menor custo para uma determinada condição apenas selecionando os processos de soldagem da raiz e do enchimento / acabamento.

## 4 | CONCLUSÕES

Por meio deste estudo, foi possível observar que a aplicação de soldagem contempla muitas variáveis a serem consideradas. Tornou-se evidente a importância desta parcela durante a fase de orçamento e que uma consideração equivocada dos parâmetros relativos pode causar sérios prejuízos para a empresa.

Foi possível concluir que a determinação usual do Custo Total dos Processos de Soldagem não é uma tarefa tão simples de ser executada, principalmente em tubulações devido à dificuldade em quantificar o volume da junta por conta de sua geometria. Além disso, uma dificuldade muitas vezes reportada ressalta que o profissional responsável pela elaboração do orçamento não tem domínio técnico em relação ao assunto. Nesse contexto torna-se evidente a grande utilidade do método proposto, na qual a aplicação não requer um conhecimento prévio de soldagem, tornando-se uma ferramenta valiosa para obtenção dos resultados relativos à estimativa dos custos com a soldagem de tubulações. Além de tornar acrescentar rapidez e facilidade ao processo.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME B31.3 **Process Piping Code for Pressure Piping**. New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2014.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME B36.1 **Welded and Seamless Wrought Steel Pipe**. New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2015.

ARAÚJO, H. R. **ANÁLISE DOS CUSTOS DE SOLDAGEM EM EVENTOS DE PARADAS PARA MANUTENÇÃO**. Anais do VI Simpósio de Engenharia de Produção. Anais... In: SIMEP 2018. Salvador, Brasil, 2018.

BRITO, J. D.; PARANHOS, R. **Como Determinar os Custos da Soldagem**. Campos dos Goytacazes – RJ: Ronaldo Paranhos, 2005.

MACHADO, I. G. **Soldagem e Técnicas Conexas: Processos**. Porto Alegre: Ivan Guerra Machado, 1996.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 3a ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. DE. **Soldagem Processos e Metalurgia**. 1ed. ed. São Paulo-SP: Edgard Blucher Ltda, 2004.

## APÊNDICE I

PROCESSOS DE SOLDAGEM			
<b>RAIZ</b> <input checked="" type="radio"/> TIG <input type="radio"/> ARAME TUBULAR <input type="radio"/> ELETRODO REVESTIDO <input type="radio"/> ARCO SUBMERSO <input type="radio"/> MIG / MAG		<b>ENCHIMENTO / ACABAMENTO</b> <input type="radio"/> TIG <input checked="" type="radio"/> ARAME TUBULAR <input type="radio"/> ELETRODO REVESTIDO <input type="radio"/> ARCO SUBMERSO <input type="radio"/> MIG / MAG	
<b>Custo da Mão de Obra (hora)</b> <b>Custo do KWh</b>		R\$ 30,00 R\$ 0,80	<div>Planilha de Descrições / Resultados</div> <div>TELA</div>
<b>ARAME TUBULAR</b>			
Custo do Metal de Adição (R\$/Kg)	R\$ 26,00	Vazão (l/min)	20
Custo do Gás Protetor (R\$/litro)	R\$ 3,50		
<b>TIG</b>			
Custo do Metal de Adição (R\$/Kg)	R\$ 70,00	Vazão (l/min)	20
Custo do Gás Protetor (R\$/litro)	R\$ 5,00		
<b>ELETRODO REVESTIDO</b>			
Custo do Metal de Adição (R\$/Kg)			
<b>ARCO SUBMERSO</b>			
Custo do Metal de Adição (R\$/Kg)		Variável	1,15
Custo do Fluxo (R\$/Kg)			
<b>ARAME SÓLIDO</b>			
Custo do Metal de Adição (R\$/Kg)		Vazão (l/min)	20
Custo do Gás Protetor (R\$/litro)			
<b>Eficiência do Material de Adição</b>		<b>Percentual Considerado</b>	
Eficiência arame sólido: 85 a 97%		0,83	
Eficiência arame tubular: 83 a 95%			
Eficiência arco submerso: 95 a 99%			
Eficiência eletrodo revestido: 60 a 75%		0,9	
Eficiência TIG:			
<b>Eficiência do Equipamento</b>		<b>Eficiência Considerada</b>	
Origo Mig 408TP (ARAME TUBULAR)		0,8	
Origo ARC 286 IR (TIG)		0,75	
Origo ARC 286 IR (ELETRODO REVESTIDO)			
LAF 1251 BR (ARCO SUBMERSO)			
Origo Mig 408TP (ARAME SÓLIDO)			
<b>Equipamentos</b>		<b>Valores Considerados</b>	
		<b>Corrente (A)</b>	<b>Tensão (V)</b>
Origo Mig 408TP (ARAME TUBULAR)		360	35
Origo ARC 286 IR (TIG)		180	18
Origo ARC 286 IR (ELETRODO REVESTIDO)			
LAF 1251 BR (ARCO SUBMERSO)			
Origo Mig 408TP (ARAME SÓLIDO)			
<b>Taxa horária de deposição Real</b>			
<b>TIG</b>			
Processo de Soldagem	GTAW	Taxa horária de deposição Ideal	Fator de Marcha / Cadência
Consumível	ER70S-3	1,3	0,2
Diâmetro	3,2		
Corrente / Tensão	5 a 280 A / 22 a 31 V		
<b>ARAME TUBULAR</b>			
Processo de Soldagem	FCAW	Taxa horária de deposição Ideal	Fator de Marcha / Cadência
Consumível	E71T-1C	4,92	0,45
Diâmetro	1,2		
Corrente / Tensão	150 a 360 A / 28 a 35 V		
		Taxa horária de deposição Real	0,26
			2,214

Figura 3. Atualização da Configuração do Custos.

Fonte: Própria (2020).

# APÊNDICE II

PROCESSO GTAW - TIG														
DN	Ø Ext.	Identificação	Espessura	Quant. de Juntas	Raiz / Ench. / Acab.	Enchimento / Acabamento	TOTAL	Quant. do Material de Adição (Kg)	Tempo Real de Soldagem	Custo da Mão de Obra	Custo do Metal de Adição	Custo do Gás	Custo da Energia Elétrica	Custo Total do Processo
					Para Espessura ≤ 5 mm	Para Espessura > 5 mm								
					Raiz - Para Espessura > 5 mm									
1"	33,4	XS/SCH 80	4,5	53	0,023	0	0,023	1,354	04:41:18	R\$ 140,65	R\$ 94,81	R\$ 28,13	R\$ 16,20	R\$ 304,98
1.1/2"	48,3	XS/SCH 80	5,1	47	0,041	0	0,041	2,141	07:24:42	R\$ 222,35	R\$ 149,88	R\$ 44,47	R\$ 25,61	R\$ 482,12
2"	60,3	SCH 160	8,74	41	0,032	0,103	0,135	1,458	05:02:46	R\$ 151,38	R\$ 102,04	R\$ 30,28	R\$ 17,44	R\$ 328,25
3"	88,9	XS/SCH 80	7,6	38	0,053	0,114	0,167	2,238	07:44:46	R\$ 232,38	R\$ 156,64	R\$ 46,48	R\$ 26,77	R\$ 503,88
3"	88,9	SCH 160	11,13	56	0,072	0,279	0,351	4,48	15:30:28	R\$ 465,23	R\$ 313,60	R\$ 93,05	R\$ 53,59	R\$ 1.008,76
4"	114,3	SCH 120	11,13	74	0,098	0,361	0,459	8,058	03:53:32	R\$ 836,77	R\$ 564,04	R\$ 167,35	R\$ 96,40	R\$ 1.814,37
6"	168,3	SCH 120	14,27	28	0,147	0,917	1,064	4,573	15:49:51	R\$ 474,92	R\$ 320,13	R\$ 94,98	R\$ 54,71	R\$ 1.029,78
6"	168,3	SCH 160	18,26	29	0,139	1,398	1,537	4,479	15:30:14	R\$ 465,12	R\$ 313,52	R\$ 93,02	R\$ 53,58	R\$ 1.008,51
8"	219,1	XS/SCH 80	12,7	15	0,202	0,894	1,096	3,367	11:39:14	R\$ 349,62	R\$ 235,67	R\$ 69,92	R\$ 40,28	R\$ 758,07
10"	273	SCH 80	15,09	22	0,252	1,657	1,909	6,16	21:19:23	R\$ 639,69	R\$ 431,20	R\$ 127,94	R\$ 73,69	R\$ 1.387,05
12"	323,8	SCH 80	17,48	25	0,299	2,55	2,849	8,306	04:45:00	R\$ 862,50	R\$ 581,39	R\$ 172,50	R\$ 99,36	R\$ 1.870,17
14"	355,6	SCH 40	11,13	27	0,344	1,143	1,487	10,32	11:43:23	R\$ 1.071,69	R\$ 722,40	R\$ 214,34	R\$ 123,46	R\$ 2.323,76
16"	406,4	XS/SCH 40	12,7	18	0,393	1,674	2,067	7,86	03:12:28	R\$ 816,23	R\$ 550,20	R\$ 163,25	R\$ 94,03	R\$ 1.769,84
18"	457	SCH 40	14,27	7	0,441	2,536	2,977	3,43	11:52:23	R\$ 356,19	R\$ 240,10	R\$ 71,24	R\$ 41,03	R\$ 772,33
20"	508	SCH 40	15,09	11	0,491	3,113	3,604	6,001	20:46:23	R\$ 623,19	R\$ 420,08	R\$ 124,64	R\$ 71,79	R\$ 1.351,27
TOTAL POR PROCESSO								74,224	16:55:51	R\$ 7.707,92	R\$ 5.195,71	R\$ 1.541,58	R\$ 887,95	R\$ 16.713,16

Figura 4. Inserção de dados e geração de resultados conforme estudo de caso.  
Fonte: Própria (2020).

ENCHIMENTO / ACABAMENTO							TOTAL POR DIÂMETRO					
PROCESSO FCAW - ARAME TUBULAR												
Quant. do Material de Adição (Kg)	Tempo Real de Soldagem	Custo da Mão de Obra	Custo do Metal de Adição	Custo do Gás	Custo da Energia Elétrica	Custo do Processo	Tempo Total de Soldagem	Custo Total de Mão de Obra	Custo Total do Metal de Adição	Custo Total do Gás	Custo Total da Energia Elétrica	Custo Total
0	00:00:00	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	04:41:18	R\$ 140,65	R\$ 94,81	R\$ 28,13	R\$ 16,20	R\$ 304,98
0	00:00:00	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	07:24:42	R\$ 222,35	R\$ 149,88	R\$ 44,47	R\$ 25,61	R\$ 482,12
5,1	01:54:27	R\$ 57,22	R\$ 132,29	R\$ 8,01	R\$ 24,03	R\$ 241,49	06:57:13	R\$ 208,61	R\$ 234,33	R\$ 38,29	R\$ 41,47	R\$ 569,74
5,2	01:57:24	R\$ 58,70	R\$ 135,70	R\$ 8,22	R\$ 24,65	R\$ 247,73	09:42:10	R\$ 291,08	R\$ 292,35	R\$ 54,69	R\$ 51,42	R\$ 751,61
18,8	07:03:25	R\$ 211,71	R\$ 489,43	R\$ 29,64	R\$ 88,92	R\$ 893,46	22:33:53	R\$ 676,94	R\$ 803,03	R\$ 122,69	R\$ 142,51	R\$ 1.902,23
32,2	12:03:57	R\$ 361,98	R\$ 836,82	R\$ 50,68	R\$ 152,03	R\$ 1.527,65	15:57:30	R\$ 1.198,75	R\$ 1.400,87	R\$ 218,03	R\$ 248,43	R\$ 3.342,02
30,9	11:35:50	R\$ 347,91	R\$ 804,31	R\$ 48,71	R\$ 146,12	R\$ 1.468,29	03:25:40	R\$ 822,84	R\$ 1.124,44	R\$ 143,69	R\$ 200,83	R\$ 2.498,07
48,8	18:18:42	R\$ 549,35	R\$ 1.269,99	R\$ 76,91	R\$ 230,73	R\$ 2.318,40	09:48:56	R\$ 1.014,46	R\$ 1.583,51	R\$ 169,93	R\$ 284,31	R\$ 3.326,92
16,2	06:03:25	R\$ 181,71	R\$ 420,07	R\$ 25,44	R\$ 76,32	R\$ 766,85	17:42:39	R\$ 531,32	R\$ 655,74	R\$ 95,36	R\$ 116,59	R\$ 1.524,93
43,9	16:27:55	R\$ 493,96	R\$ 1.141,93	R\$ 69,15	R\$ 207,46	R\$ 2.084,63	13:47:18	R\$ 1.133,65	R\$ 1.573,13	R\$ 197,09	R\$ 281,15	R\$ 3.471,68
76,8	04:47:39	R\$ 863,82	R\$ 1.996,99	R\$ 120,93	R\$ 362,80	R\$ 3.645,56	09:32:39	R\$ 1.726,32	R\$ 2.578,38	R\$ 293,43	R\$ 462,16	R\$ 5.515,72
37,2	13:56:20	R\$ 418,17	R\$ 966,73	R\$ 58,54	R\$ 175,63	R\$ 1.764,79	01:39:44	R\$ 1.489,86	R\$ 1.689,13	R\$ 272,88	R\$ 299,09	R\$ 4.088,55
36,3	13:36:35	R\$ 408,29	R\$ 943,89	R\$ 57,16	R\$ 171,48	R\$ 1.723,11	16:49:03	R\$ 1.224,52	R\$ 1.494,09	R\$ 220,41	R\$ 265,51	R\$ 3.492,95
21,4	08:01:05	R\$ 240,54	R\$ 556,09	R\$ 33,68	R\$ 101,03	R\$ 1.015,15	19:53:28	R\$ 596,73	R\$ 796,19	R\$ 104,91	R\$ 142,06	R\$ 1.787,49
41,3	15:28:00	R\$ 464,00	R\$ 1.072,67	R\$ 64,96	R\$ 194,88	R\$ 1.958,19	12:14:23	R\$ 1.087,19	R\$ 1.492,75	R\$ 189,60	R\$ 266,67	R\$ 3.309,47
414,1	11:14:43	R\$ 4.657,36	R\$ 10.766,91	R\$ 652,03	R\$ 1.956,09	R\$ 19.655,31	412:10:34	R\$ 12.365,28	R\$ 15.962,62	R\$ 2.193,61	R\$ 2.844,04	R\$ 36.368,46

Figura 4. Inserção de dados e geração de resultados conforme estudo de caso (Continuação).  
Fonte: Própria (2020).

## APLICAÇÃO DE MQL NO TORNEAMENTO DO AÇO SAE 4340 COM INSERTO DE METAL DURO TEXTURIZADO A LASER E REVESTIDO DE TiAlN

*Data de aceite: 01/06/2021*

*Data de submissão: 29/03/2021*

### **Rhander Viana**

Universidade de Brasília, Faculdade UnB-FGA,  
Área Especial de Indústria Projeção A, Setor  
Leste, Gama  
Brasília-DF  
<http://lattes.cnpq.br/5270141650315822>

### **Milton Sérgio Fernandes de Lima**

Instituto de Estudos Avançados (IEAv-CTA)  
São José dos Campos-SP  
<http://lattes.cnpq.br/2656804839083572>

### **Paulo Vinícius da Silva Resende**

Instituto Federal de Goiás (IFG), Campus  
Goiânia, Setor Central  
Goiânia-GO  
<http://lattes.cnpq.br/7662245385672395>

**RESUMO:** A texturização a laser de superfícies é um método atualmente muito popular, a sua aplicação resulta em diversos benefícios em diferentes áreas, como a área de metal mecânica, especificamente, a usinagem. Na usinagem a texturização a laser pode aumentar a vida de ferramentas de corte por aumentar a adesividade dos revestimentos cerâmicos sobre o substrato. Além disso, a textura ordenada da superfície pode alterar a interação entre a ferramenta e a peça na zona de corte, tanto para a usinagem a seco quanto para usinagem com fluido de corte. O objetivo deste trabalho consiste em comparar

por meio de ensaios de vida de ferramentas e acabamento superficial da peça usinada no torneamento do aço SAE 4340 a seco e com aplicação de fluido de corte por jorro e MQL (Mínima Quantidade de Lubrificante), insertos de metal duro da classe ISO P modificados superficialmente, por meio de texturização a laser e jateamento, e posteriormente revestidos de TiAlN (Nitreto de Titânio). Os resultados mostraram um melhor desempenho nos ensaios de vida dos insertos texturizados por jateamento, e um melhor acabamento da peça torneada com a utilização do revestimento TiAlN, tanto para o substrato jateado quanto texturizado a laser em relação a ferramenta sem revestimento. A aplicação de fluido de corte por MQL mostrou-se eficiente nos ensaios de vida, aumentando a vida das ferramentas, excepcionalmente, na ferramenta TiAlN-jateada. Nos ensaios de acabamento superficial, medição da rugosidade média aritmética ( $R_a$ ), a aplicação de MQL não se mostrou eficiente. A caracterização superficial por MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) mostrou que a ferramenta TiAlN-laser sofreu um destacamento precoce do revestimento, o que provavelmente justifica o seu pobre desempenho nos ensaios de vida.

**PALAVRAS-CHAVE:** Laser, texturização, mql, torneamento, TiAlN.

## MQL APPLICATION IN SAE STEEL TURNING 4340 WITH TEXTURIZED CARBIDE INSERT LASER AND TiAlN COATING

**ABSTRACT:** Laser surface texturing has become popular method in recent years, its application results in several benefits in different fields, such as machining. In machining, laser texturing can increase the life of cutting tools by increasing the adhesion of ceramic coatings on the substrate. In addition, the ordered texture of the surface can change the interaction between the tool and the part in the cutting zone, both for dry and for cutting fluid machining. The goal of this work is to compare through tool life tests and surface finishing of the machined part in dry turning of SAE 4340 steel and with application of flood cutting fluid and MQL (Minimum Quantity Lubrication), surface modified carbide inserts of ISO P grade by means of laser texturing and blasting, and then coated with TiAlN (Titanium Aluminium Nitride). The results showed a better performance in the life tests of the blasted textured inserts, and a better finish of the turned part with the use of the TiAlN coating, both for the sandblasted and laser textured substrate in relation to the uncoated tool. The application of cutting fluid by MQL proved to be efficient in life tests, increasing the tool life, exceptionally, in the TiAlN-sandblasted tool. In surface finishing tests, measuring the average arithmetic roughness (Ra), the application of MQL was not efficient. The superficial characterization by SEM (Scanning Electron Microscopy) showed that the TiAlN-laser tool suffered an early detachment of the coating, which probably justifies its poor performance in life tests.

**KEYWORDS:** Laser, texturing, mql, turning, TiAlN.

### 1 | INTRODUÇÃO

Os revestimentos cerâmicos compostos por carbeto ou nitreto de metais de transição, tais como TiC (Carbeto de Titânio), TaC (Carbeto de Tântalo), NbC (Carbeto de Nióbio), TiN (Nitreto de Titânio), TiCN (Carbonitreto de Titânio) e TiAlN (Nitreto de Titânio Alumínio), propiciam proteção ao desgaste, resistência ao calor, resistência a corrosão, boa adesão ao substrato, exibem elevada dureza e são aplicados em componentes mecânicos, ferramentas de corte, como revestimentos ópticos e decorativos. (Suh *et al.*, 2003)

Em virtude da grande aplicabilidade industrial dos revestimentos, há uma necessidade crescente em compreender as propriedades fundamentais desses filmes duros, e como eles agem na proteção de uma superfície.

O estudo dos revestimentos tem um aspecto multidisciplinar, pois envolve o conhecimento de suas propriedades químicas, físicas e tribológicas. (Santos, 2002)

A diferença no desempenho de ferramentas de corte revestidas e ferramentas sem revestimentos é resultado da interação entre essas propriedades, que, provavelmente, modificam a região de interface cavaco-ferramenta, aumentando o desempenho da ferramenta revestida. Na necessidade de entender como os revestimentos modificam o desempenho das ferramentas de corte é importante que o revestimento seja analisado tanto em ensaios de usinagem quanto em ensaios que possam caracterizar sua morfologia, sua microestrutura e principalmente sua adesividade sobre o substrato.

A atuação do revestimento depositado sobre a superfície da ferramenta em suportar mudanças constantes nas solicitações mecânicas e térmicas do processo de usinagem, dependerá, sobretudo, de uma boa adesividade sobre o substrato. Uma adesividade adequada do revestimento é muito importante, pois a ferramenta com revestimento com adesividade insuficiente pode se comportar pior que aquela sem revestimento. A formação de partículas duras e abrasivas, resultantes da destruição prematura do revestimento, acelera o desgaste das superfícies que estão em contato. (Lima *et al.*, 2005)

Daí advém à importância de se ter novos processos de deposição disponíveis, um melhor controle do processo de deposição, das fontes de suprimento dos materiais que constituem o revestimento, materiais de substrato com propriedades que ofereçam menor discrepância com as propriedades do revestimento e mesmo técnicas que possam modificar fisicamente o substrato sem alterar significativamente suas propriedades mecânicas para melhorar a adesividade na interface substrato/revestimento.

O desenvolvimento de substratos de ferramentas com propriedades compatíveis com as propriedades do revestimento podem ser uma boa alternativa para melhorar a adesividade do revestimento sobre o substrato. Mas deve-se atentar, por exemplo, ao fato de que um aumento de dureza do substrato para se aproximar da dureza do revestimento, obtendo-se assim menor discrepância entre essas propriedades, pode ocasionar um efeito um tanto indesejável ao substrato, que é a diminuição de sua tenacidade. (Leyland e Matthews, 2000). Isso pode ser indesejável nas ferramentas de corte para usinagem, principalmente, no corte intermitente, onde as ferramentas sofrem constantemente com os impactos na peça e solicitações de compressão e tração ao entrarem e saírem da peça, respectivamente.

Uma boa opção para aproximar as propriedades do substrato da ferramenta e do revestimento, sem causar prejuízo à tenacidade da ferramenta, é modificar as propriedades do substrato, somente em regiões próximas a interface com o revestimento. (Sun *et al.*, 1995)

Dentro deste contexto um meio atualmente difundido é a texturização a laser da superfície. Nos últimos anos, a texturização a laser tem se apresentado como uma opção competitiva para a produção de furos e ou alteração da textura superficial prévia da superfície. (Low *et al.*, 2001) Exemplos estão presentes na indústria aeronáutica, que tem empregado essa técnica em componentes de turbina (palhetas), na câmara de combustão (Corfe, 1983), e em microtecnologia, onde os problemas de lubrificação permanente de componentes miniaturizados, devido à mínima quantidade de lubrificante e à dificuldade de confiná-lo nas superfícies em contato, constituem um desafio. (Blatter *et al.*, 1999; Watanabe *et al.*, 2000)

Nos processos de usinagem, a texturização a laser é utilizada para a melhoria das propriedades de adesividade de revestimentos duros sobre superfícies de ferramentas de corte. No processo de texturização a laser, um laser de pulsos curtos e de alta taxa



de repetição provoca uma texturização advinda da formação de poças líquidas. Após a solidificação dessas poças, ocorre a formação de nanoestruturas que permitem uma melhor ancoragem do revestimento.

A interação do laser com o material é influenciada por fatores como natureza do substrato, composição e estrutura da superfície, energia, frequência e largura do pulso laser, e interação com a atmosfera. Neste processo pode ocorrer à limpeza e a texturização simultâneas do substrato, o material recebe uma quantidade de energia adicional para refundir superficialmente. Macroscopicamente, a rugosidade da superfície aumenta, em geral devido à formação de crateras oriundas da fusão e ablação do material (Lima *et al.*, 2005), o que provavelmente pode colaborar para aumentar a adesividade do revestimento no substrato.

Este meio de modificação da textura do substrato de ferramentas de corte através de feixes de laser com o intuito de melhorar a adesividade de revestimentos é relativamente novo na usinagem, e carece ainda de muitas investigações visto que são poucos os trabalhos publicados na área. Pelo seu potencial observa-se que é uma alternativa muito promissora para melhorar a adesividade de revestimentos em ferramentas de corte.

Outra frente de pesquisa relevante na usinagem nos últimos anos são os fluidos de corte e suas formas de aplicação, uma vez que são indispensáveis tecnicamente na usinagem de diversos materiais. No entanto, podem prejudicar o meio ambiente e também a saúde do operador da máquina. Consequentemente, a interação entre ferramentas texturizadas e o uso de fluidos de corte e sua forma de aplicação é outro tema interessante a se pesquisar na área de usinagem. (Machado *et al.*, 2021)

O uso de fluido de corte é significativo em qualquer operação de usinagem, para resfriar a ferramenta de corte e a superfície da peça, e/ou lubrificar a interface ferramenta-peça, e promover a remoção de cavacos da zona de corte. Recentemente, muitas pesquisas têm focado na lubrificação com mínima quantidade de lubrificante ou fluido de corte (MQL ou MQF) entre os vários métodos existentes na aplicação de um refrigerante/lubrificante. (Said *et al.*, 2019)

O MQL/MQF reduz o uso de refrigerante/lubrificante ao impelir na zona de corte uma mistura de ar comprimido e fluido de corte em quantidades reduzidas, na média até 50 ml/h. Para certas operações de usinagem, como no fresamento com ferramentas com diâmetros maiores do que 40 mm, essa quantidade pode ser maior do que 150 ml/h por um curto período de tempo (DGUV, 2010). O método MQL/MQF demonstra ser apropriado na usinagem, pois a aplicação de uma névoa fina de fluido de corte com ar comprimido na zona de corte atende às necessidades de uma usinagem “verde”, com solução ecológica e econômica. (Kamata e Obykawa, 2007; Pervaiz *et al.*, 2019; Said *et al.*, 2019).

Assim, a principal justificativa para realização deste trabalho é contribuir com novas investigações e fornecer dados que darão suporte técnico na viabilização da utilização da

texturização superficial de ferramentas de corte utilizando feixe de laser com aplicação de mínima quantidade de lubrificante.

A princípio a contribuição deste trabalho teve o intuito de avaliar o desempenho de insertos de metal duro da classe ISO P jateados e revestidos de TiAlN (Nitreto de Titânio Alumínio) utilizados comercialmente, e insertos de metal duro da classe ISO P texturizados a laser e revestidos de TiAlN por meio de ensaios de vida de ferramentas e ensaios de acabamento superficial da peça usinada no torneamento do aço SAE 4340 com aplicação de MQL, usinagem a seco e com jorro de fluido de corte. O conjugado substrato/revestimento da ferramenta foi também avaliado por meio de ensaios de microscopia e adesividade de revestimentos.

## 2 | METODOLOGIA

### 2.1 Ensaios de Vida

A metodologia para execução dos ensaios de vida foi baseada na avaliação e comparação do desempenho de insertos de metal duro da classe ISO P texturizados por laser e jateamento mediante ensaios de torneamento do aço SAE 4340. A vida da ferramenta de corte foi avaliada por meio da medição do desgaste de flanco médio ( $VB_B = 0,3 \text{ mm}$ ) utilizando-se um estereomicroscópio Zoom 645T - Koye. Os ensaios de vida foram realizados a seco, sem aplicação de fluido de corte, com jorro e MQL (Mínima Quantidade de Lubrificante) para três ferramentas testadas - sem revestimento (SR), jateada e revestida de TiAlN, e laser e revestida de TiAlN. O fluido de corte utilizado foi o Rocol Ultracut 250 HW aplicado por jorro e MQL. Na aplicação MQL foi utilizada uma vazão de 50 ml/h com pressão de 6 bar, com apenas um bico de injeção inclinado a  $45^\circ$  em relação a ponta da ferramenta, e aplicação de fluido de corte por jorro com vazão de 20 l/min.

Nos ensaios foram obtidas as médias de vida das três ferramentas testadas, para três repetições, ou seja, três arestas de corte foram utilizadas nos testes. As ferramentas utilizadas nos testes apresentam especificação CNMG 12 04 08 H13A, o revestimento de TiAlN foi depositado pela empresa Oerlikon Balzers. Os ensaios de vida foram executados em um Torno CNC modelo Diplomat Logic 195 VS. Os corpos de prova utilizados nos ensaios de vida foram tarugos cilíndricos do aço SAE 4340 com diâmetro de 50,8 mm e comprimento de 113 mm, as condições de corte utilizadas são mostradas na Tab. (1).

Nesta etapa utilizou-se também de microscopia óptica, estereomicroscópio Zoom 645T - Koye, e eletrônica de varredura (MEV), modelo MEV Jeol JSM-7000F, para a caracterização do desgaste e análise superficial das ferramentas.

Parâmetro	Valor
Velocidade de corte [m/min]	200
Avanço [mm/rotação]	0,5
Profundidade de corte [mm]	2,0
Comprimento de usinagem [mm]	50

Tabela 1 - Condições de corte utilizadas nos ensaios de vida.

Fonte: elaborado pelo autor.

## 2.2 Ensaios de Rugosidade

Os ensaios de rugosidade foram realizados utilizando-se um rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-210. Nos ensaios foram obtidas as rugosidades médias (Ra) da superfície usinada sem aplicação de fluido de corte e com aplicação por jorro e MQL, com três medições para cada ferramenta ensaiada com varredura a 120° uma da outra. As aplicações de jorro e MQL seguem as mesmas condições dadas nos ensaios de vida, com aplicação de MQL numa vazão de 50 ml/h com pressão de 6 bar, bico de injeção inclinado a 45° em relação a ponta da ferramenta, e aplicação de fluido de corte por jorro com vazão de 20 l/min.

Os ensaios de rugosidade também foram executados no Torno CNC modelo Diplomat Logic 195 VS.

Os corpos de prova utilizados nos ensaios de rugosidade também eram de aço SAE 4340 com as mesmas dimensões dos corpos de prova dos ensaios de vida. As condições de corte utilizadas nos ensaios de rugosidade constam na Tab. (2).

Parâmetro	Valor
Velocidade de corte [m/min]	200
Avanço [mm/rotação]	0,1
Profundidade de corte [mm]	1,0
Comprimento de usinagem [mm]	50

Tabela 2 - Condições de corte utilizadas nos ensaios de rugosidade.

Fonte: elaborado pelo autor.

## 2.3 Análise Morfológica do Conjugado Substrato/Revestimento

As ferramentas texturizadas a laser foram modificadas com o uso de um feixe do tipo CuHBr (Hidreto de Cobre e Bromo) com potência de 4 W, desenvolvido pelo Instituto de Estudos Avançados (IEAv) do Centro Técnico Aeroespacial (CTA) em São José dos Campos.

Para a análise morfológica dos conjugados substratos/revestimentos foram realizados ensaios de microscopia óptica e confocal a laser. O objetivo do ensaio de microscopia óptica foi caracterizar a superfície dos conjugados quanto às diferenças macroscópicas existentes nas texturas laser e jateada. O equipamento utilizado nessa análise foi um estereomicroscópio Zoom 645T - Koye.

Já o ensaio de Microscopia Confocal a Laser teve como objetivo estudar de forma mais realística e precisa as características das superfícies das ferramentas texturizadas e revestidas, com a utilização de um microscópio óptico Zeiss Axio Imager 2 acoplado a um sistema de varredura laser Zeiss LSM 700, equipado com laser de diodo (405 nm) e lente objetiva EC PLAN-NEOFLUAR 40x0,75. As imagens foram geradas a partir de mosaicos de 5 x 5 imagens totalizando uma área de varredura de 800x800  $\mu\text{m}$ .

Com as imagens obtidas foi possível comparar a topografia das ferramentas por meio da medição dos parâmetros de amplitude das rugosidades ( $S_q$ ,  $S_a$  e  $S_z$ ) e parâmetros de distribuição de amplitude ou estatísticos ( $S_{sk}$  e  $S_{ku}$ ), variação da forma, irregularidades e alterações provocadas pelas texturizações a laser e jateada.

## 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Ensaios de Vida e Caracterização das Ferramentas

A Figura 1 mostra os resultados obtidos nos ensaios de vida das ferramentas testadas. A ferramenta com pior desempenho foi a sem revestimento, tanto a seco quanto com aplicação de fluido de corte por jorro e MQL, com uma média de vida de aproximadamente 0,13 m de usinagem, equivalente a três passadas.

A ferramenta com melhor desempenho nos ensaios de vida foi a ferramenta revestida de TiAlN com substrato jateado, tanto a seco quanto com aplicação de fluido de corte por jorro e MQL, com uma média de vida de aproximadamente 7,08 m, equivalente a 140 passadas até atingir o desgaste de flanco médio de 0,3 mm, chegando ao fim de vida.

Na avaliação quanto à usinagem com fluido de corte, observa-se na Fig. (1), que a utilização de jorro e MQL aumentaram a vida das ferramentas, com maior destaque para a ferramenta de TiAlN-jateada.

Provavelmente, a aplicação do fluido de corte, por jorro e MQL, modificou a zona de corte, particularmente, a zona de cisalhamento secundário na usinagem, ocasionando uma diminuição no atrito na interface cavaco-ferramenta e no calor gerado, possibilitando um aumento na vida da ferramenta.

Quanto ao comportamento dos substratos testados, jateado e laser, observa-se que a ferramenta TiAlN-jateada teve um desempenho muito superior, tanto a seco quanto com aplicação de jorro e MQL, em relação a ferramenta TiAlN-laser. A justificativa para este resultado pode estar na adesão do revestimento TiAlN sobre os substratos jateado e laser.

A Figura 2 mostra imagens da superfície de saída da ferramenta TiAlN-Laser. Nas imagens observa-se nitidamente o destacamento precoce do revestimento TiAlN depositado.

O destacamento precoce do revestimento TiAlN na ferramenta texturizada a laser, pode estar relacionado com diferentes graus de fragilidade do revestimento, as suas propriedades elasto-plásticas, as tensões residuais internas do filme depositado e mesmo uma baixa adesividade do filme depositado sobre o substrato de metal duro com textura laser.

Uma baixa adesividade do revestimento sobre o substrato interfere claramente no comportamento da ferramenta durante o corte, pois a delaminação da camada leva ao contato prematuro do metal duro do substrato com a peça. Além disso, a fragmentação do revestimento gera partículas duras e abrasivas que interagem com o sistema tribológico peça-ferramenta, podendo acelerar ainda mais o desgaste da ferramenta. (Neves *et al.*,2006)

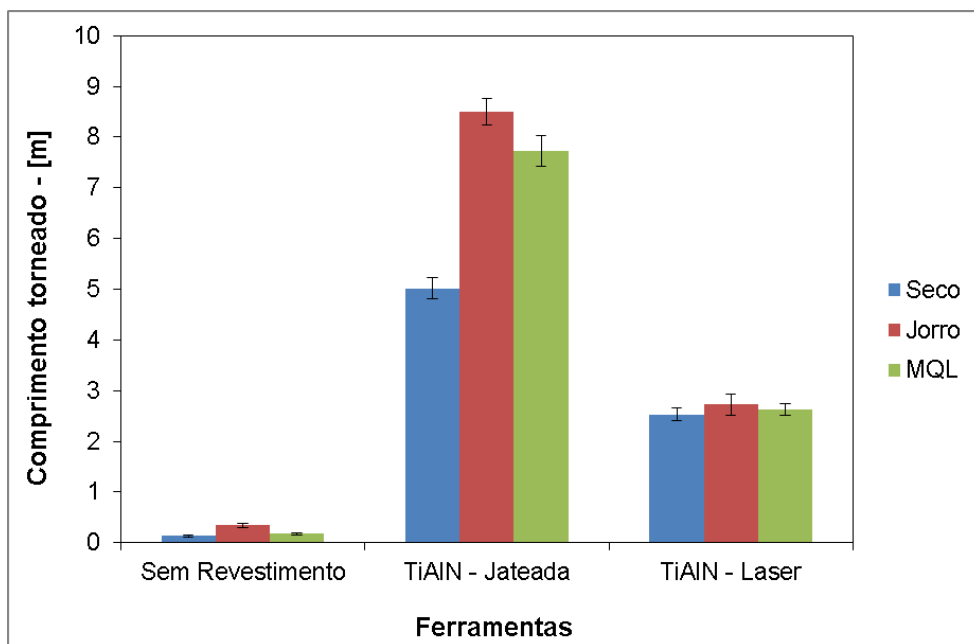


Figura 1 - Ensaio de vida no torneamento a seco do aço SAE 4340.

(Condições de corte:  $v_c = 200$  m/min,  $f = 0,5$  mm/rot e  $a_p = 2,0$  mm)

Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 3 mostra as ferramentas TiAlN-Jateada e TiAlN-Laser após o fim de vida. Observa-se claramente nas imagens um acentuado desgaste de flanco nas ferramentas. Considera-se o desgaste de flanco o mais comum entre as formas de desgaste que ocorrem em ferramentas de usinagem. Sendo até uma forma de desgaste preferível, pois indica uma vida útil da ferramenta previsível e estável. O desgaste de flanco ocorre, principalmente, devido aos mecanismos de desgaste por abrasão e *attrition*, causado por elementos duros, como carbonetos presentes no material da peça ou mesmo pelo destacamento ou delaminação precoce dos revestimentos utilizados, neste estudo TiAlN.

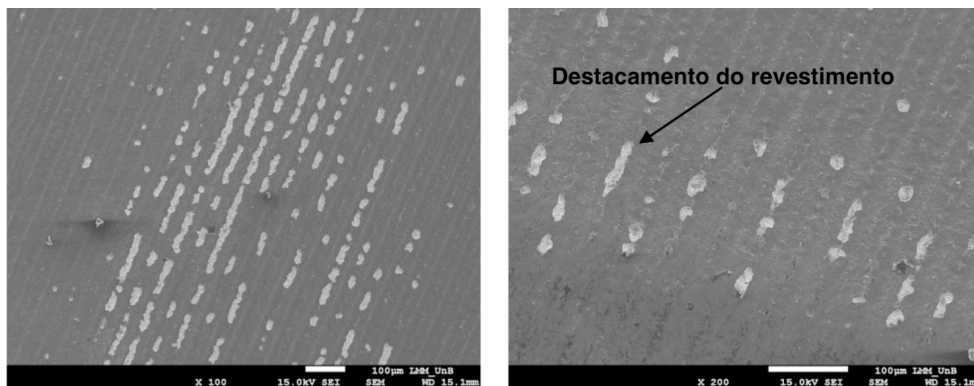
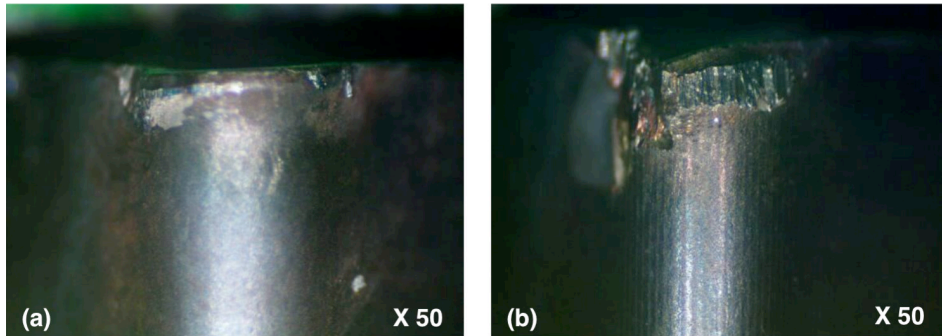


Figura 2 - MEV da superfície de saída da ferramenta TiAlN-Laser.

Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 4 mostra por meio de MEV, uma área deformada plasticamente na região do desgaste de flanco da ferramenta TiAlN-Jateada, presença de microsulcos e material da peça aderido na ferramenta, caracterizando nitidamente a atuação dos mecanismos de desgaste por abrasão e *attrition*, cujo último tem como característica marcante a aderência e o arrastamento de material da peça durante a usinagem.



(a) - TiAlN-Jateada e (b) - TiAlN-Laser.

Figura 3 - Imagens de estereomicroscópio do desgaste de flanco das ferramentas no fim de vida:

Fonte: elaborado pelo autor.

Os mecanismos de desgaste por abrasão e *attrition* também foram predominantes nas ferramentas sem revestimento e TiAlN-laser.

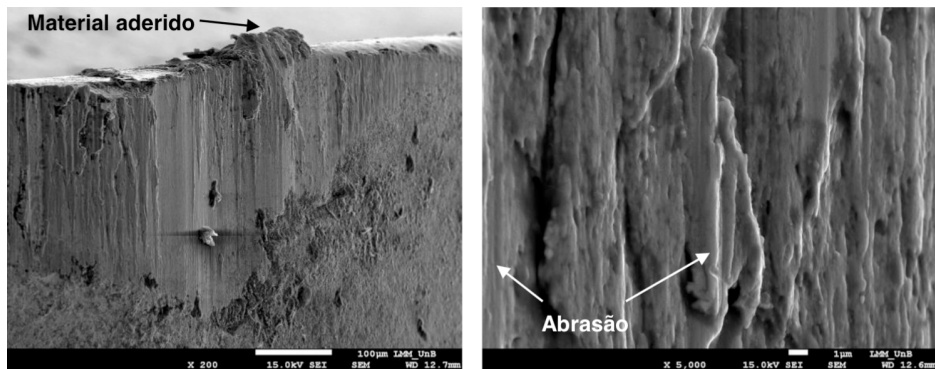


Figura 4 - Imagem de MEV do desgaste de flanco de uma ferramenta de TiAlN-Jateada.

Fonte: elaborado pelo autor.

### 3.2 Ensaios de Rugosidade

A Figura 5 mostra os resultados obtidos nos ensaios de rugosidade do aço SAE 4340 no torneamento a seco e com utilização de fluido de corte por jorro e MQL, utilizando-se as ferramentas - Sem Revestimento, TiAlN-jateada e TiAlN-laser. De maneira geral, os resultados mostram que a utilização do revestimento cerâmico, TiAlN, afeta sensivelmente o valor da rugosidade média ( $R_a$ ) da superfície torneada.

A utilização do revestimento TiAlN modifica a interface ferramenta/peça, uma vez que interfere diretamente nas áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário, diminuindo o atrito, e consequentemente, os esforços de corte durante o torneamento.

Com a diminuição dos esforços de corte, a tendência é que haja uma diminuição das microirregularidades formadas na superfície usinada, melhorando o acabamento.

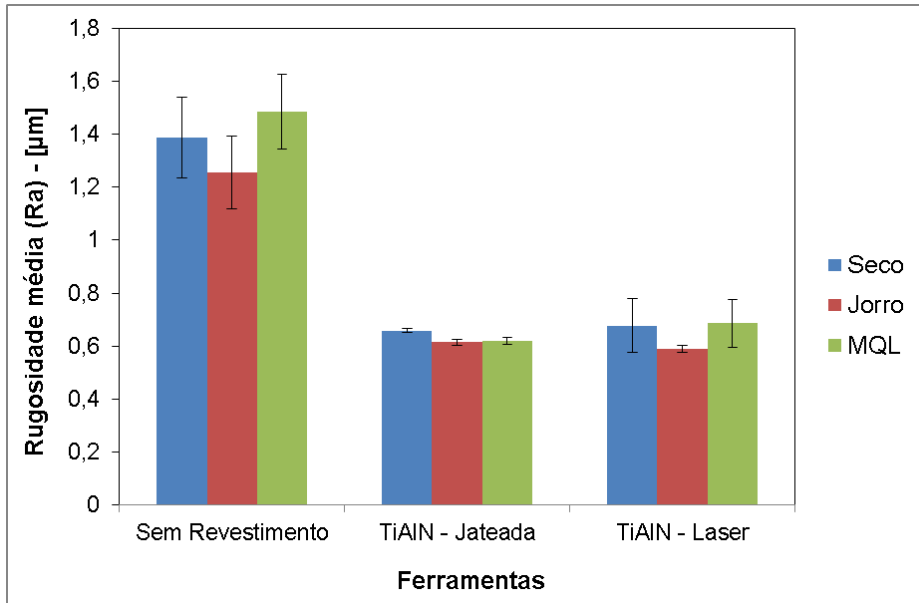


Figura 5 - Ensaio de rugosidade média (Ra) do aço SAE 4340 no torneamento a seco, com jorro e MQL. (Condições de corte:  $v_c = 200$  m/min,  $f = 0,1$  mm/rot e  $a_p = 1,0$  mm)

Fonte: elaborado pelo autor.

Quanto à diferenciação do acabamento obtido em relação ao torneamento a seco, jorro e MQL, não se observa diferença estatisticamente significativa, mostrando que o uso de fluido de corte para a operação realizada nas condições de corte dadas, não influencia na interface ferramenta/peça ao ponto de causar uma modificação nas micro irregularidades da peça torneada.

### 3.3 Microscopia Óptica e Confocal a Laser

Para a análise morfológica dos conjugados substratos/revestimentos foram realizados ensaios de microscopia óptica e confocal a laser.

A Figura 6 mostra imagens da textura da superfície de saída das ferramentas ensaiadas: TiAlN-jateada e TiAlN-laser. Com a utilização de um estéreo microscópio é possível perceber a diferença entre as texturas jateada e laser das ferramentas utilizadas. Nas ferramentas jateadas não há uma ordenação macroscópica da textura, como o arranjo paralelo de linhas visualizado na ferramenta TiAlN-laser. Essa ordenação diferenciada entre os revestimentos, provavelmente, foi crucial para o desempenho das ferramentas nos ensaios de vida.



Essencialmente a ordenação da textura na ferramenta laser foi pouca efetiva, a degradação precoce do revestimento leva a formação de “microlascas” de revestimentos de TiAlN com dureza de aproximadamente 3000 HV. Essas “microlascas” de TiAlN se tornam então parte de um sistema tribológico, causando, provavelmente, desgaste abrasivo à três corpos: peça, ferramenta e as “microlascas” de TiAlN como elemento interfacial. As “microlascas” de TiAlN são pressionadas contra a peça e a ferramenta concomitantemente, causando microtrincas, e, principalmente, microsulcos de desgaste no flanco da ferramenta, como observado na Fig. (4).

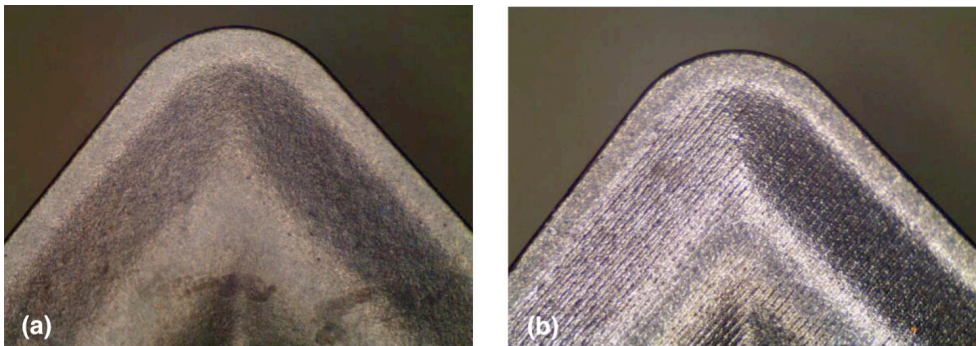


Figura 6 - Imagens de estereomicroscópio da superfície de saída das ferramentas: (a) - TiAlN-Jateada e (b) - TiAlN-Laser.

Fonte: elaborado pelo autor.

A Figura 7 mostra os resultados dos ensaios de microscopia confocal a laser para as ferramentas TiAlN-Jateada e TiAlN-Laser.

As imagens foram adquiridas por varredura laser por meio de microscopia confocal, após a varredura as imagens foram tratadas utilizando o *software MountainsMap® 8.2*.

Nas imagens é possível observar claramente que a textura jateada mostra-se aleatória, ao passo que a textura laser apresenta notoriamente uma distribuição ordenada de picos, a qual provavelmente pode alterar as condições de contato na interface cavaco-ferramenta, e ocasionalmente modificar a vida da ferramenta.

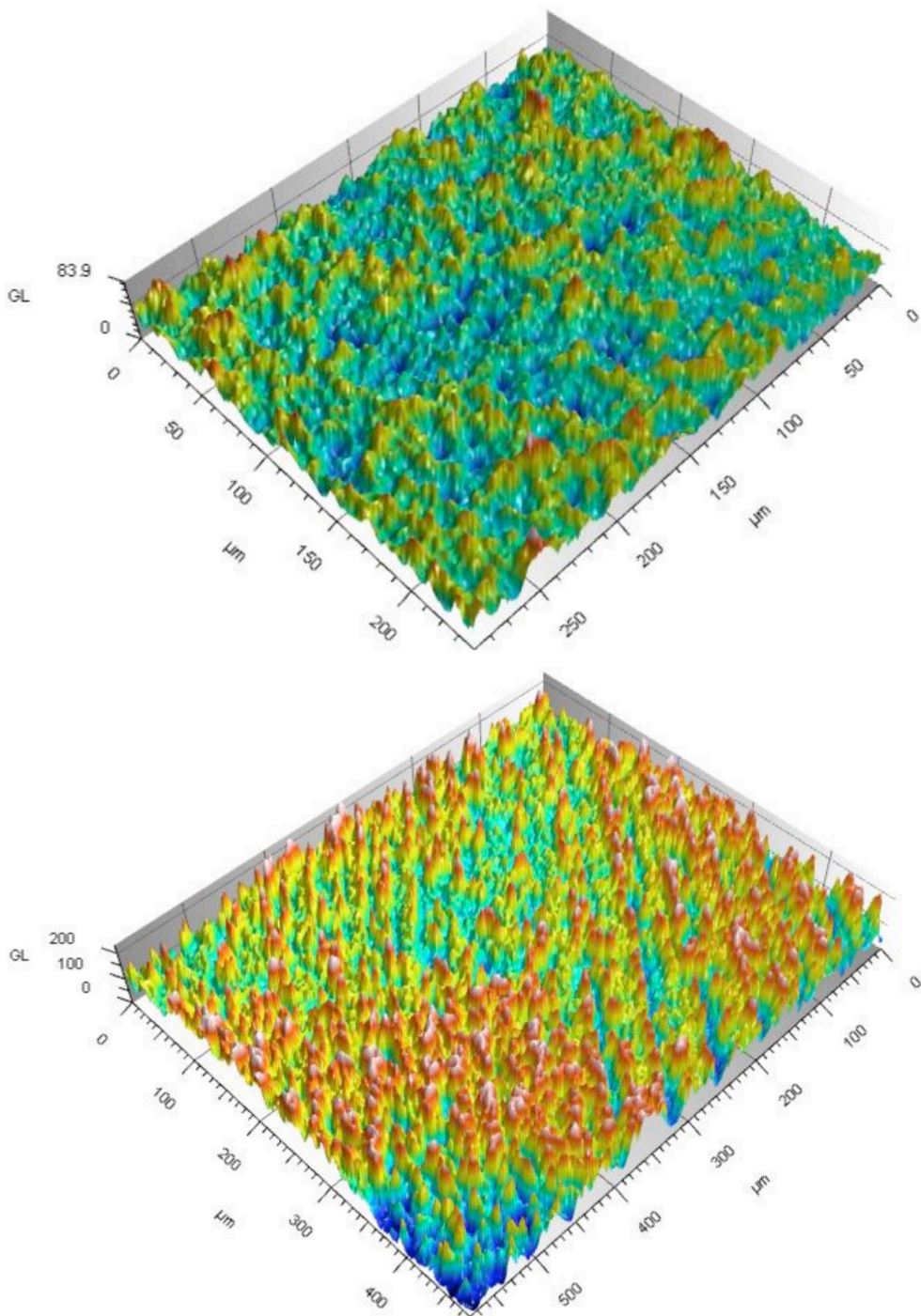


Figura 7 - Texturas das ferramentas TiAlN-Jateada (a) e TiAlN-Laser (b).

Fonte: elaborado pelo autor.

A Tabela 3 mostra os resultados das medições dos parâmetros de amplitude das rugosidades ( $S_q$ ,  $S_a$  e  $S_z$ ) e parâmetros de distribuição estatísticos ( $S_{sk}$  e  $S_{ku}$ ), obtidos na varredura laser da superfície das ferramentas por meio de microscopia confocal. Basicamente a texturização a laser provocou uma diminuição nos parâmetros de amplitude  $S_a$  e  $S_q$  das superfícies das ferramentas, o que pode corroborar para uma diminuição da rugosidade média da peça usinada. Quanto à assimetria ( $S_{sk}$ ), a distribuição da textura mostra-se enviesada moderadamente, com uma curtose acima de 3 para todas as texturas das ferramentas ensaiadas.

Ferramenta	$S_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_q$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_z$ ( $\mu\text{m}$ )	$S_{sk}$	$S_{ku}$
TiAlN-Jateada	1,221	1,505	13,729	-0,698	3,245
TiAlN-Laser	0,959	1,305	16,748	-1,620	7,203

Tabela 3 - Parâmetros de amplitude e estatísticos.  
 Fonte: elaborado pelo autor.

#### 4 | CONCLUSÃO

Neste estudo, as superfícies de insertos de metal duro foram texturizadas: (i) por feixe de laser, especificamente, ablação a laser utilizando uma fonte de CuHBr (Hidreto de Cobre e Bromo), e (ii) jateamento (processo comercial), posteriormente os insertos texturizados foram revestidos de TiAlN. O desempenho das diferentes texturas, laser e jateamento, foram testadas em ensaios de vida de ferramenta e acabamento da superfície usinada no torneamento do aço SAE 4340 a seco e com aplicação de fluido de corte por jorro e MQL. As diferentes texturas também foram caracterizadas por meio de microscopia óptica e confocal a laser. Conforme os resultados anteriormente apresentados e discutidos, as seguintes conclusões foram obtidas:

- Nos ensaios de vida, o revestimento TiAlN aumentou significativamente o comprimento torneado em relação a ferramenta sem revestimento, tanto a seco quanto com aplicação de jorro e MQL;
- A ferramenta TiAlN-jateada apresentou o melhor resultado nos ensaios de vida, seguida pela ferramenta TiAlN-laser;
- Provavelmente o destacamento precoce do TiAlN depositado no substrato com textura laser, foi o fator preponderante para o seu baixo desempenho nos ensaios de vida;
- A utilização do TiAlN diminuiu a rugosidade aritmética média ( $R_a$ ) da superfície torneada em relação a ferramenta sem revestimento;

- A aplicação de fluido de corte por jorro e MQL aumentou a vida das ferramentas em relação a usinagem a seco, excepcionalmente, para a ferramenta TiAlN-jateada;
- A aplicação de fluido de corte por jorro e MQL não alterou significativamente o acabamento superficial da superfície torneada em relação a usinagem a seco.

## AGRADECIMENTOS

Ao Decanato de Pesquisa e Inovação da UnB (DPI-UnB) por meio dos editais de financiamento a pesquisa DPI/UnB 04/2019 e DPI/DPG 03/2020, e a Fundação de Apoio a Pesquisa do Distrito Federal (FAPDF) pelo financiamento a pesquisa por meio do edital 03/2016, processo 0193.001259/2016.

## REFERÊNCIAS

Blatter, A., Maillat, M., Pimenov, S.M., Shafeev, G.A., Simakin A.V., Loubnin, E. N., 1999, **Lubricated Sliding Performance of Laser-Patterned Sapphire**, Wear, v. 232, pp. 226-230.

Corfe, A.G., 1983, **Laser Drilling of Aero Engine Components**, In: Proceedings of the First International Conference on Lasers in Manufacturing. Brighton, East Sussex, pp. 31-40.

DGUV, 2010, **Minimum Quantity Lubrication for Machining Operations**, Publisher Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Edition November, pp. 1-84.

Kamata, Y., Obikawa, T., 2007, **High Speed MQL Finish-Turning of Inconel 718 with Different Coated Tools**, Journal of Materials Processing Technology, v. 192, pp. 281-286.

Leyland, A., Matthews, A., 2000, **On the Significance of the H/E ratio in Wear Control: a Nanocomposite Coating Approach to Optimized Tribological Behavior**, Wear, v. 246, pp. 1-11.

Lima, M. S. F., Neves, D., Diniz, A. E., 2005, **Machining with a Laser Treated Tool Steel Drill: Surface and Tool Life Aspects**, I International Conference on Heat Treatment and Surface Engineering of Tools and Dies, Pula-Croatia, 8-11 de Junho.

Low, D. K. Y., Li, L., Corfe, A. G., Byrd, P. J., 2001, **Spatter-free Laser Percussion Drilling of Closely Spaced Array Holes**, International Journal of Machine Tools & Manufacture, v. 41, pp. 361-377.

Machado, A. R., Silva, L. R. R., Souza, F. C. R., Davis, R., Pereira, L. C., Sales, W. F., Rossi, W., Ezugwu, E. O., 2021, **State of the Art of Tool Texturing in Machining**, Journal of Materials Processing Technology, v. 293, pp. 1-23.

Neves, D., Diniz, A. E., Lima, M. S. F., 2006, **Efficiency of the Laser Texturing on the Adhesion of the Coated Twist Drills**, Journal of Materials Processing Technology, v. 179, pp. 139-145.

Pervaiz, S., Anwar, S., Qureshi, I., Ahmed, N., 2019, **Recent Advances in the Machining of Titanium Alloys Using Minimum Quantity Lubrication (MQL) Based Techniques**, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, v. 6(1), pp. 133-145.

Said, Z., Gupta, M., Hegab, H., Arora, N., Khan, A. M., Jamil, M., Bello, E., 2019, **A Comprehensive Review on Minimum Quantity Lubrication (MQL) in Machining Processes Using Nano-Cutting Fluids**, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 1, pp. 1-30.

Santos, S. C., 2002, **Estudo da Influência de Revestimentos e da Aplicação de Fluido de Corte no Desempenho de Brocas de Aço-Rápido e de Metal Duro Integral na Usinagem de Ferro Fundido Cinzento**, Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, pp. 192.

Suh, C. M., Hwang, B. W., Murakami, R. I., 2003, **Behaviors of Residual Stress and High Temperature Fatigue Life in Ceramic Coatings Produced by PVD**, Materials Science and Engineering A, v. 343, pp. 1-7.

Sun, Y., Bloyce, A., Bell, T., 1995, **Finite Element Analysis of Plastic Deformation of Various TiN Coating/Substrate Systems under Normal Contact with a Rigid Sphere**, Thin Solid Films, v. 271, pp. 112-131.

Watanabe, K., Natsume, J., Hashizume, K., Ozasa, T. O., Nada, T., Masuda, Y., 2000, **Theoretical Analysis of Bearing Performance of Microgrooved Bearing**, JSAE Review, v. 21, pp. 29-33.

## ESTUDO DO GRADIENTE DE TEMPERATURA DURANTE O FRESAMENTO DO AÇO AISI 4340 UTILIZANDO O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

*Data de aceite: 01/06/2021*

*Data de submissão: 16/03/2021*

**Nicollas Vivaldini**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Cornélio Procópio – Paraná  
<http://lattes.cnpq.br/3496912045419621>

**Rodrigo Henriques Lopes da Silva**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Cornélio Procópio – Paraná  
<http://lattes.cnpq.br/5977232724834847>

**RESUMO:** O trabalho estuda a modelagem pelo Método de Elementos Finitos (MEF) para a formação de cavacos, possibilitando avaliar a distribuição de temperatura na região de corte, utilizando as mais recentes ferramentas oferecidas pelos softwares de simulação por elementos finitos. Na simulação, a ferramenta foi modelada como metal duro e a peça como AISI 4340, utilizando-se da metodologia de Johnson-Cook. Quatro modelos foram simulados para possibilitar o estudo da influência da velocidade de corte e avanço por dente na geração de calor durante o fresamento, com isso possibilitando verificar a precisão do modelo. A comparação é realizada para as velocidades de corte de 100 e 200 m/min e para os avanços por dente de 0,16 e 0,25 mm/dente. Os resultados obtidos mostram que conforme se eleva a velocidade de corte e/ou o avanço, a temperatura de corte também se eleva, convergindo com a literatura, também foi possível verificar como a temperatura se

comporta nas três zonas de cisalhamento. Por fim, o modelo apresentou ótimos resultados, uma vez que possibilitou o estudo do comportamento da temperatura na zona de corte, durante o fresamento.

**PALAVRAS-CHAVE:** Temperatura de corte, Usinagem, Elementos Finitos.

### STUDY OF THE TEMPERATURE GRADIENT DURING MILLING AISI 4340 STEEL USING THE FINITE ELEMENT METHOD

**ABSTRACT:** The present work studies the Finite Element Method (FEM) modeling for chip formation, making it possible to evaluate the temperature distribution in the cutting region, using the most recent tools offered by finite elements software. In the simulation, the cutting tool was modeled as carbide and the workpiece as AISI 4340, using the Johnson-Cook Methodology. Four models were simulated to enable the study of the influence of cutting speed and feed rate on the heat generation during side milling. Thus, it is possible to verify the accuracy of the model. The comparison has been made for 100 and 200 m/min cutting speeds and 0,16 and 0,25 mm/tooth feeds. The results show that as the cutting speed and/or the feed increase, the cutting temperature also rises, which converges to the literature. It was also possible to verify how the temperature behaves in the three shear zones. Finally, the model presented excellent results, and it was possible to study the temperature behavior in the cutting zone during side milling.

**KEYWORDS:** Cutting temperature, Machining, Finite Elements.

# 1 | INTRODUÇÃO

Segundo Trent e Wright (2000), o custo de fabricação na usinagem é dependente da taxa de remoção do material, podendo-se reduzir o custo quando se aumenta essa taxa, principalmente com o aumento da velocidade de corte. Entretanto, há um limite para o crescimento da velocidade de corte, pois a vida da ferramenta é extremamente reduzida, de modo semelhante ao que ocorre com o avanço.

Nesse sentido, conforme Ozel (2006), existem pesquisas voltadas ao desenvolvimento de métodos analíticos e numéricos para descrever o processo de usinagem. Entre essas metodologias há a simulação em elementos finitos, cujo intuito é estudar e prever o modo que ocorre a formação de cavaco, a taxa de deformação, as temperaturas e as forças de corte durante a usinagem. Essas previsões são de grande utilidade para indústria, podendo otimizar a geometria da ferramenta e o processo de corte, contribuindo com o aumento da produtividade.

Portanto, o objetivo do trabalho foi estudar o gradiente de temperatura na superfície de corte, com foco na peça, por meio do modelamento térmico de usinagem utilizando elementos finitos para o aço AISI 4340 durante o fresamento tangencial, com simplificação para o corte ortogonal. Podendo comparar o comportamento da temperatura quando se aumenta a velocidade de corte e/ou o avanço.

# 2 | MODELO DE JOHNSON-COOK

Segundo Cervelin (2009), na simulação de corte de metais é importante modelar corretamente o comportamento dos materiais, a fim de obter resultados próximos dos reais em processo de usinagem.

Nesse contexto, estudou-se o modelo de material de Johnson-Cook, que segundo Coelho et al. (2006) é um dos métodos mais convenientes e um dos que gera excelentes resultados ao descrever o comportamento do material na formação de cavaco. Com isso, o material da peça foi modelado como isotrópico termo-elasto-plástico seguindo a curva de Johnson-Cook para o aço AISI 4340. Como a ferramenta não foi o foco da análise, ela foi modelada como perfeitamente elástica.

A ruptura do material foi modelada seguindo o critério de ruptura de Johnson-Cook, em que o material se rompe quando a deformação plástica equivalente atinge um valor crítico. Segue nas tabelas 1 e 2 os parâmetros de Johnson-Cook para o aço AISI 4340.

A (MPa)	B(MPa)	C	n	m	T <sub>Fusão</sub> (°C)	T <sub>Amb.</sub> (°C)
792	510	0,014	0,26	1,03	1520	30

Tabela 1– Parâmetros de Johnson-Cook que descrevem o comportamento do material.

Fonte: Johnson-Cook (1985).



D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>5</sub>
0,05	3,44	-2,12	0,002	0,61

Tabela 2 – Parâmetros de Johnson-Cook que descrevem a ruptura do material.

Fonte: Johnson-Cook (1985).

Em que  $T_{\text{room}}$  é a temperatura ambiente,  $T_{\text{melt}}$  é a temperatura de fusão. As constantes são: “A” a tensão de cisalhamento equivalente, “B” o módulo de encruamento, “n” o expoente do trabalho a frio, “C” o coeficiente da taxa de deformação, “m” o coeficiente térmico. E  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ ,  $D_4$ ,  $D_5$  são constantes de ruptura do material.

### 3 | CALOR GERADO NO PROCESSO DE USINAGEM

Segundo Knysh e Korkolis (2015), a maior parte do trabalho plástico aplicado é dissipado em calor aos arredores do material deformado. Portanto, com referência em bibliografias estudadas, para o presente trabalho considerou-se que 90% da deformação plástica gerada durante a usinagem será convertida em calor.

O atrito na região de corte possui elevada complexidade, gerando limitações de sua modelagem no *software*. Portanto, modelou-se o atrito de maneira mais simples, mas que gera resultados consideráveis, conforme o trabalho de Hui (2007), que em sua pesquisa utilizou o coeficiente de atrito de  $\mu = 0,65$  e obteve bons resultados. Portanto utilizou-se do mesmo coeficiente de atrito do autor.

Por fim, segundo Nascimento (2011), para o corte ortogonal em duas dimensões, a equação 1 é a que governa a transferência de calor:

$$\rho C_p \left( v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) - k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \dot{Q} = 0 \quad (1)$$

Em que  $k$  é condutividade térmica [W/m°C],  $v_y$  é a componente da velocidade em  $y$  [m/s],  $v_x$  é a componente da velocidade em  $x$  [m/s],  $T$  é a temperatura [°C],  $\rho$  é a densidade do material [kg/m³],  $C_p$  é o calor específico [J/Kg°C] e  $Q$  é a geração de calor por unidade de volume [W/m³].

### 4 | PARÂMETROS DE ENTRADA PARA A SIMULAÇÃO

O modelo de elementos finitos foi realizado conforme o modelo físico real para o fresamento concordante, realizando algumas considerações/simplificações necessárias para que seja possível a implementação do modelo no *software*. Com isso conforme a figura 1 apresenta, o modelo real com as simplificações.



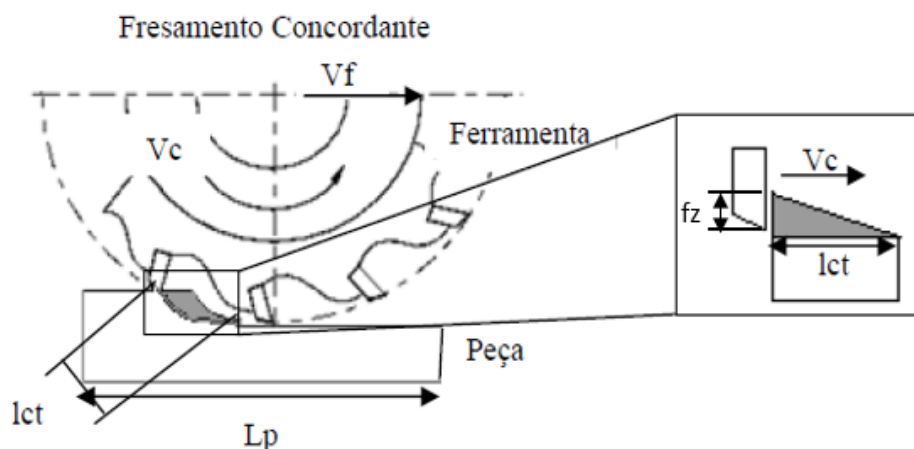


Figura 1 – Simplificação do perfil do material retirado, sendo triangular ou trapezoidal.

Fonte: Nascimento (2011).

Em que  $V_f$  é a velocidade de avanço,  $V_c$  é a velocidade de corte,  $f_z$  é o avanço por dente,  $l_{ct}$  é o comprimento do material removido e  $L_p$  é o comprimento da peça.

Com as propriedades estruturais do material da peça já apresentadas, conforme o modelo de Johnson-Cook, vê-se necessário apresentar as propriedades físicas do material da peça e da ferramenta, conforme a tabela 3 apresenta.

Parâmetros térmicos	Metal duro	AISI 4340
Módulo de Young [GPa]	400	200
Densidade [kg/m³]	14950	7830
Condutividade térmica [W/(m.°C)]	20	38
Coefficiente de Poisson	0,21	0,29
Calor específico [J/(Kg.°C)]	210	477
Expansão térmica [μm/m.°C]	-	0,000032
$T_{Fusão}$ [°C]	-	1520
$T_{Amb.}$ [°C]	30	30

Tabela 3 – Propriedades físicas dos materiais.

Fonte: Adaptado de Johnson-Cook (1985).

Por fim a tabela 4 apresenta as combinações dos parâmetros de usinagem utilizados para a simulação, sendo a penetração de trabalho de 0,55 mm que resulta em um comprimento de material removido de 3mm.

$v_c$ (m/min)	$f$ (mm/dente)	Peça (AISI)
100	0,16	4340
100	0,25	4340
200	0,16	4340
200	0,25	4340

Tabela 4 – Parâmetros de corte utilizados na simulação.

Fonte: Autoria própria (2020).

## 5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a simulação finalizada e os resultados obtidos iniciou-se as análises referentes aos objetivos do trabalho. Portanto, é possível observar na figura 2 as três zonas de cisalhamento durante a usinagem, sendo a primária, secundária e terciária. Com isso, o modelo converge com a teoria ao demonstrar as três principais regiões de geração de calor já cientificamente conhecidas.

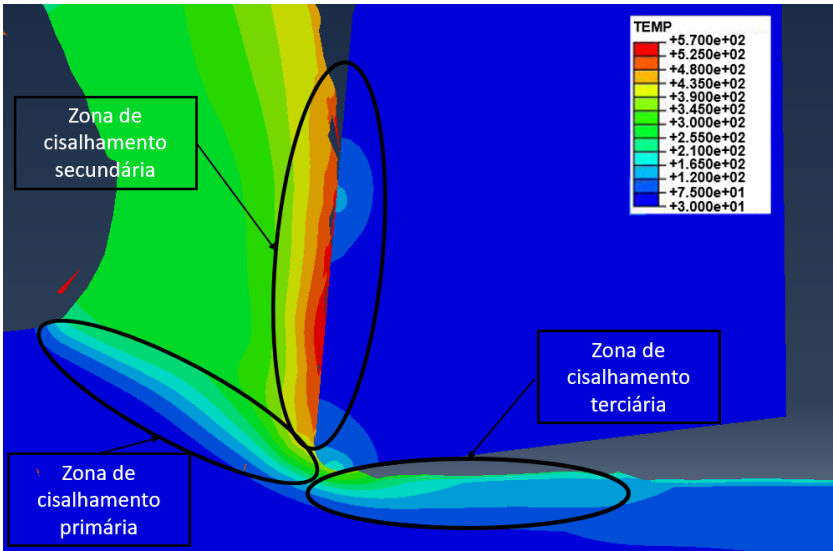


Figura 2 – Zonas de cisalhamento para o gradiente de temperatura.

Fonte: Autoria própria (2020).

Além do gradiente de temperatura, pode-se observar também o gradiente de fluxo líquido de calor, conforme a figura 3 apresenta.

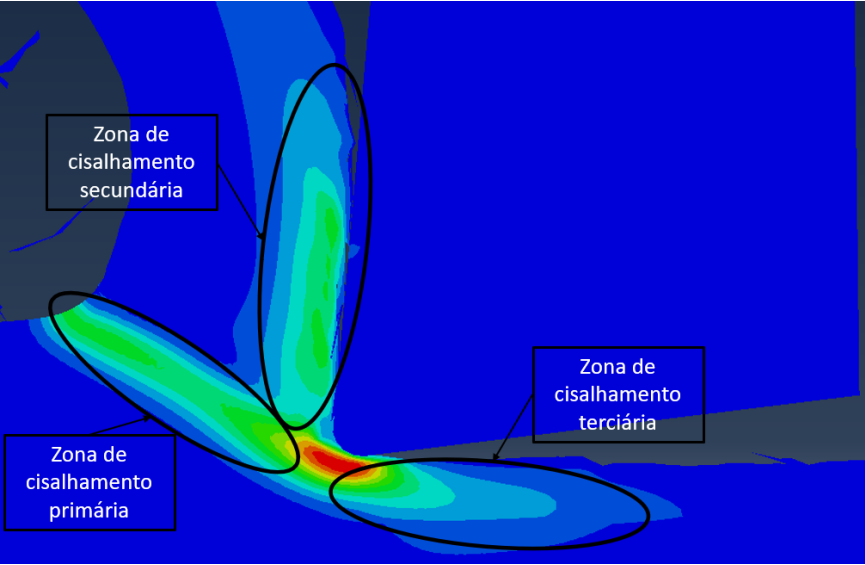


Figura 3 – Zonas de cisalhamento para o gradiente de fluxo de calor líquido, podendo ser verificado também a influência do raio de arredondamento de aresta na geração de calor.

Fonte: Autoria própria (2020).

Após o exame dos resultados nos planos de cisalhamento, por meio das imagens obtidas pelas simulações, e da influência do raio de arredondamento da aresta de corte, analisou-se as respostas referentes às temperaturas geradas nas condições de usinagem propostas. Com isso elaborou-se a tabela 5 com as temperaturas máximas obtidas das simulações para os parâmetros de corte propostos.

Temperatura máxima [°C]	Velocidade de corte [m/min]	Avanço [mm/dente]
530	100	0,16
570	100	0,25
579	200	0,16
610	200	0,25

Tabela 5 – Temperaturas obtidas para cada parâmetro de corte.

Fonte: Autoria própria (2020).

Podendo verificar-se que, conforme a bibliografia sugere, ao aumentar a velocidade de corte e/ou o avanço a temperatura de corte também se eleva.

## 6 | CONCLUSÕES

Com os resultados finalizados, pode-se concluir que:

a) A utilização da simulação, por elementos finitos, no processo de corte é um método eficaz para avaliação da temperatura e fluxo de calor na zona de corte, possibilitando o estudo e escolha do uso de parâmetros de usinagem que proporcionem uma maior produtividade, garantindo a qualidade da peça usinada;

b) Pode-se pontuar como qualidade do método FEM: a economia de material e de tempo em relação aos experimentos, podendo avaliar a distribuição da temperatura nas zonas de cisalhamento. O modelo proposto indica que a temperatura gerada é mais elevada na zona de cisalhamento secundária do que na zona de cisalhamento primária, por elevar-se o calor durante o deslizamento do cavaco;

c) Com o presente modelo, pode-se afirmar que o avanço e a velocidade de corte possuem papéis importantes, devido a sua influência na geração de calor nas zonas de cisalhamento primária, secundária e terciária;

d) Foi possível observar as três zonas de cisalhamento indicadas pela teoria e como a temperatura se distribui em cada uma delas. Os resultados também mostram como o cavaco se forma na interface cavaco-ferramenta.

## REFERÊNCIAS

CERVELIN, J. E. Estudo teórico-experimental das forças de corte no processo de torneamento. 2009. Tese (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18140/tde-28092009-152513/pt-br.php>. Acesso em: 11 fev. 2020.

COELHO, R. T.; NG, E. -G.; ELBESTAWI, M. A. Tool wear when turning hardened AISI 4340 with coated PCBN tools using finishing cutting conditions. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. v.47, p.263-272, 2006.

HUI, H. H. Simulação da formação de cavacos usando FEM (Finite Element Method) – Temperatura e força. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18145/tde-11122007-162007/pt-br.php>. Acesso em: 20 Jan. 2020.

JOHNSON G. R.; COOK, W. H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Engineering Fracture Mechanic*. v.21, n. 1, p. 31-48, 1985.

KNYSH, P.; KORKOLIS, Y. P. Determination of the fraction of plastic work converted into heat in metals. *Mechanics of Materials*. v. 86, p.71-80, 2015.

NASCIMENTO, C. H. Estudo da distribuição de temperatura na região de formação de cavacos usando Métodos dos Elementos Finitos. 2011. Tese (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18156/tde-03062011-091310/pt-br.php>. Acesso em: 15 Jan. 2020.

OZEL, T. The influence of friction models on finite element simulations of machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Vol. 46, p. 518-530, 2006.

TRENT, E.M.; WRIGHT, P. K. *Metal cutting*. 4ª ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000.

# CAPÍTULO 11

## IDENTIFICAÇÃO DO MOMENTO IDEAL DE TROCA DE FERRAMENTAS DE CORTE ATRAVÉS DO MONITORAMENTO DO DESGASTE POR SINAL DE VIBRAÇÃO E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Data de aceite: 01/06/2021

Data de submissão: 23/02/2021

**Lucas Costa Brito**

Universidade Federal de Uberlândia (UFU),  
Faculdade de Engenharia Mecânica  
Uberlândia, Minas Gerais  
lattes.cnpq.br/9519306355864837

**Márcio Bacci da Silva**

Universidade Federal de Uberlândia (UFU),  
Faculdade de Engenharia Mecânica  
Uberlândia, Minas Gerais  
lattes.cnpq.br/9291398329256011

**Marcus Antonio Viana Duarte**

Universidade Federal de Uberlândia (UFU),  
Faculdade de Engenharia Mecânica  
Uberlândia, Minas Gerais  
lattes.cnpq.br/9030389274220180

**RESUMO:** Uma das variáveis mais importantes no processo de usinagem é o desgaste da ferramenta. Assim, o monitoramento do desgaste das ferramentas de corte torna-se essencial para garantir o sucesso do produto, aumentar a produtividade, reduzir o impacto ambiental e evitar danos catastróficos. Para contornar as dificuldades das técnicas tradicionais de monitoramento do desgaste, propõe-se uma nova abordagem na aplicação de técnicas de inteligência artificial não supervisionadas. O objetivo principal do trabalho é identificar o momento ideal de troca da ferramenta com base no sinal de vibração coletado durante o

processo de torneamento. A partir de sinais de vibração, utilizou-se redes neurais mapas auto-organizáveis (SOM), para identificar a condição de desgaste da ferramenta. Conjunto de dados desbalanceados para tornar as análises mais próximas da realidade industrial foram utilizados. Realizou-se testes com ferramentas em diferentes condições de desgaste e variando os parâmetros de corte. Os resultados obtidos permitem concluir que é possível avaliar a condição de desgaste da ferramenta de corte com a técnica de inteligência artificial aplicada, utilizando somente o sinal de vibração com taxas de acerto de até 92 %. Além disso, a metodologia permite aplicações industriais por utilizar uma técnica não supervisionada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Redes Neurais SOM, Monitoramento, Ferramentas de Corte, Torneamento.

### IDENTIFICATION OF THE TIME TO EXCHANGE CUTTING TOOLS THROUGH WEAR MONITORING USING VIBRATION SIGNALS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE

**ABSTRACT:** One of the most important parameters in machining process is tool wear. Thus, monitoring the wear of cutting tools is essential to ensure product quality, increase productivity, reduce environmental impact and avoid catastrophic damages. To overcome the difficulties of traditional wear monitoring techniques, a new approach is proposed in the application of unsupervised artificial intelligence techniques. The main objective of this work is to identify the ideal tool change time based on

the vibration signal collected during the turning process. Based on vibration signals, self-organizing maps (SOM) neural networks were used to identify the wear condition of the tool. Imbalanced data sets were used to simulate the industrial reality. Tests were carried out with tools in different wear conditions and varying the cutting parameters. The results showed that it is possible to evaluate the wear condition of the cutting tool with the applied artificial intelligence technique, using only the vibration signal with up to 92% accuracy. In addition, the methodology allows industrial applications as it is an unsupervised technique.

**KEYWORDS:** Self-Organizing Maps (SOM) , Monitoring, Cutting Tools, Turning.

## 1 | INTRODUÇÃO

O desgaste da ferramenta de corte é uma das consequências inerentes do processo de usinagem, o que torna o monitoramento da mesma essencial para garantia da qualidade, confiabilidade e produtividade dos sistemas de fabricação. Visando evitar as consequências dos desgastes trocas desnecessárias de ferramentas são frequentemente realizadas. Estudos mostram que ferramentas de usinagem em máquinas de comando numérico são trocadas com apenas 50 a 80% de sua vida útil, Liu et al. (2018 a,b). Essa prática além de aumentar o custo de produção, tem alto impacto ambiental em função da quantidade de energia e material necessário para produzir uma ferramenta. O monitoramento on-line do desgaste da ferramenta possibilita determinar o momento ideal de troca da ferramenta, resultando no aumento da produtividade, otimização dos custos de processo, e cumprimento das políticas atuais de zero-defeito de produção, Mikołajczyk et al. (2018).

Ao longo do processo de usinagem, devido principalmente ao desgaste, a ferramenta tem sua geometria inicial alterada, influenciando diretamente na qualidade do produto e nas tolerâncias dimensionais alcançadas. O aumento do raio de ponta da ferramenta por exemplo, pode influenciar significativamente as tensões residuais numa peça, Liu et al. (2004). Além disso, desgastes severos podem resultar na quebra inesperada da ferramenta, que por sua vez, pode ocasionar quebras ainda maiores, como o de componentes da máquina ferramenta, Rizal et al. (2017).

Monitorar o desgaste não é uma tarefa simples, principalmente devido a natureza do desgaste, Kannatey-Asibu et al. (2017). Normalmente, mais de um mecanismo de desgaste pode estar envolvido no processo. Trent e Wright (2000) por exemplo, identifica 6 mecanismos distintos de desgaste numa ferramenta de usinagem: abrasão, adesão, difusão, cisalhamento superficial a altas temperaturas, deformação plástica e entalhe. A presença de diversos mecanismos de desgaste dificulta ainda mais a determinação dos corretos parâmetros para criação um sistema que seja capaz de identificá-lo, Nouri et al. (2015). No monitoramento direto, outros fatores dificultam ainda mais a determinação da condição de vida da ferramenta, tais como: a presença do fluido de corte, impossibilitando as medições do desgaste com microscópio ou a necessidade de parar a máquina para uma medição mais precisa. No caso de medição através da rugosidade da peça, a complexidade das peças torna a medida de rugosidade ainda mais complicada.

Uma forma alternativa para monitorar o desgaste é utilizar métodos indiretos. Ou seja, monitorar e analisar parâmetros obtidos através de sinais de vibração, emissão acústica, força de corte, temperatura de corte, torque e corrente do motor principal, por exemplo.

Dentre as várias possibilidades de monitoramento indireto, pesquisas mostram o sucesso da utilização do sinal de vibração para classificação da condição de desgaste da ferramenta, Siddhpura e Paurobally (2013). Rizal et al. (2017) durante o estudo em fresamento utilizando multi-sensores e *Mahalanobis-Taguchi system* (MTS) mostrou ser o sinal de vibração um dos parâmetros de maior relevância para o método de classificação, com acurácia média de 88.89%. Sevilla et al. (2015 a,b) mostraram que devido a seu baixo custo e fácil instalação, sensores de vibração são amplamente utilizados em monitoramento da condição da ferramenta (*Tool Condition Monitoring* - TCM). Prasad e Babu (2017) provaram que no processo de torneamento existe grande correlação entre o sinal de vibração e o desgaste da ferramenta, através da análise numérica e experimental, avaliando a amplitude do sinal e o desgaste. Rmili et al. (2016) propuseram um método de identificação da condição da ferramenta baseado na análise de vibração alinhado a um sistema automático de detecção em processo de torneamento.

Alinhado a utilização de sinais de vibração, e outros métodos de medição indireto, diversos estudos, como mostrado em Zhou e Xue (2018), vêm sendo realizados com objetivo de desenvolver modelos de inteligência artificial confiáveis para a identificação da condição de desgaste da ferramenta de corte. Yen et al. (2013) utilizaram a técnica *self-organization feature map* (SOM) juntamente com o sinal de emissão acústica (AE) para monitoramento do desgaste da ferramenta na microusinagem, obtendo uma taxa de classificação média de 98% para a condição da ferramenta. Da Silva et al. (2016) aplicaram uma rede neural probabilística para classificação da condição de desgaste em operação de fresamento, obtendo até 91% de acerto. Hassana et al. (2018) compararam seis *benchmarks* para classificar desgaste da ferramenta, dentre elas, redes neurais, *support vector machine* (SVM) e *k-nearest neighbor* (kNN), obtendo até 90% de acerto com SVM.

A maioria dos estudos de TCM trabalha com modelos em que os dados são balanceados (o que, em geral, facilita a aprendizagem do modelo), ou seja, mesma quantidade de sinais para classes (no caso do trabalho, normal e desgastada). Além disso, os classificadores são supervisionados, o que não representa a realidade industrial, limitando sua aplicação. Além disso, muitos trabalhos incluem mais de um sensor, o que pode contribuir para aumentar o custo de implementação em larga escala.

Portanto, o objetivo desse trabalho é desenvolver um método utilizando técnica de inteligência artificial não supervisionada para identificar o momento ideal de troca da ferramenta de corte. Para isso, propôs a utilização de uma rede neural SOM. Em função da ampla gama de aplicações e baixo custo de implementação optou-se por utilizar o monitoramento através do sinal de vibração.



O trabalho encontra-se organizado da seguinte forma. Seção 2 tem-se uma breve explicação sobre o método utilizado. Na seção 3 a metodologia é apresentada. A montagem dos testes e aquisição dos sinais são discutidos na seção 4. Na seção 5 tem-se as análises dos resultados obtidos. E por fim, a seção 6 conclui o trabalho.

## 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Rede Neural SOM (Self-Organizing Map)

A rede SOM foi implementada com sucesso em inúmeras aplicações, em áreas como identificação de falhas, classificação, reconhecimento de voz e análise de *cluster* (Lia et al. 2018; Mikaeil et al. 2018; Lokesh et al. 2019; Mutheneni et al. 2018; Jain et al. 2018; Burnap et al. 2018).

O procedimento basicamente se resume em uma transformação não linear de um espaço de alta dimensão para um espaço com baixa dimensão Cai et al. (2014). Automaticamente, as amostras do conjunto de dados são agrupadas de acordo com suas similaridades, separando aquelas com características diferentes em outros grupos.

A arquitetura da SOM corresponde a uma rede neural com uma camada competitiva bidimensional ou unidimensional, onde existe interação lateral entre os neurônios dentro de uma vizinhança. A rede combina competição como uma forma de aprendizagem objetivando o melhor ajuste dos pesos. Primeiramente, inicia-se os pesos com valores aleatórios pequenos. Em seguida, o conjunto de entrada é apresentado. Através da técnica de quantização vetorial, calcula-se a similaridade, definindo a unidade de melhor correspondência (*best matching unit* - BMU), minimizando o erro de quantização Cai et al. (2014) e o neurônio vencedor é tido como vizinhança topológica.

Baseados nas respostas anteriores, o modelo é atualizado ajustando os pesos até a convergência final determinada, como apresentado na Equação 1, Kohonen (1995), onde  $m_i$  é o vetor de referência mais próximo de  $x$ ,  $t$  é o índice dos passos de regressão,  $x$  é a amostra,  $h_{c(x),i}$  é a função da vizinhança e a taxa de aprendizado.

$$m_i(t+1) = m_i(t) + a(t)h_{c(x),i}(x(t) - m_i(t)) \quad (1)$$

Em resumo, primeiro realiza-se o treinamento não supervisionado com base nos dados apresentados e no processo competitivo supracitado. Posteriormente, realiza-se a classificação dos novos dados em relação aos mapas definidos no treinamento Kohonen (1995).

### 3 | METODOLOGIA

Os testes experimentais foram realizados no torno CNC e os sinais de vibração das ferramentas coletados em diferentes condições de desgastes. Foram utilizadas duas condições de usinagem, para teste e validação do método. Os sinais adquiridos foram processados e parâmetros vibratórios extraídos para serem utilizados como entradas no sistema de classificação.

Para seleção dos parâmetros vibratórios que melhor representam a condição de desgaste da ferramenta, realizou-se a normalização dos dados e o Teste de Grubbs a fim de eliminar valores extremos (*outliers*) do grupo considerado em condições de desgaste normal. O teste *t* de comparação da população foi aplicado para selecionar os parâmetros vibratórios. Os parâmetros selecionados através do teste *t*, foram utilizados como entrada para treinamento dos classificadores, possibilitando a classificação de novas ferramentas.

#### 3.1 Extração dos parâmetros

Os parâmetros de entrada dos modelos de inteligência artificial devem ser escolhidos cuidadosamente a fim de contribuir na criação de modelos com boa generalização e alta assertividade. Além de evitar problemas como *overfitting* e *underfitting* e reduzir custo computacional dos mesmos. Selecionar os parâmetros que apresentam correlação com o desgaste da ferramenta é a chave para o sucesso do modelo, Xie et al. (2019). Para o estudo, 71 parâmetros relacionados a análise estatística, domínio do tempo, e frequência foram extraídos dos sinais brutos de vibração, Tabela 1.

#### 3.2 Pré-processamento dos dados

Os dados foram pré-processados para garantir a eficiência do método. A normalização foi realizada de acordo com Equação 2, Lu e Wan (2013), onde  $(x_{max}^j)$  é o valor máximo e  $(x_{min}^j)$  o valor mínimo das amostras para cada parâmetro (*j*), sendo  $(x_i^j)$  o valor para o *j* parâmetro da amostra *i*.

$$(X_i^j) = \frac{x_i^j - x_{min}^j}{x_{max}^j - x_{min}^j} \quad (2)$$

Número do Parâmetro	Descrição
1	Média
2	Assimetria ( <i>Skewness</i> )
3	Curtose ( <i>Kurtosis</i> )
4	Valor Pico
5	Valor Pico-a-Pico
6	Nível RMS em função da amplitude do sinal
7	Fator de Crista
8	K4 [ $10\log_{10}(\text{RMS} \cdot \text{Curtose})$ ]
9-29	Energia em bandas de frequências
30-71	Energia em envelope em bandas de frequências

Tabela 1. Parâmetros estatístico, domínio do tempo e frequência.

Fonte: Autor (2020).

Teste de Grubbs foi utilizado para identificação dos valores extremos (*outliers*) no grupo de treinamento, Wang et al. (2018), Grubbs (1969). O teste  $t$  foi utilizado para definir os parâmetros que apresentam maior correlação com o desgaste da ferramenta. Os parâmetros que resultaram em maiores valores da razão  $T = t/t_{\text{crítico}}$  foram selecionados. O cálculo da razão  $t$  é realizado com duas hipóteses básicas acerca da média, sendo  $H_0: \mu_1 = \mu_2$  e  $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$ , onde  $\mu_1$  e  $\mu_2$  são as médias populacionais dos parâmetros das ferramentas com desgaste normal e crítico, respectivamente.

Utilizando uma alternativa bilateral, tem-se que a hipótese nula ( $H_0$ ) será rejeitada com nível de significância ( $\alpha$ ) de 5%, se  $t > t_{\text{críticosuperior}}$  ou  $t < t_{\text{críticoinferior}}$ .

### 3.3 Treinamento, teste e modelo

O método não supervisionado SOM foi utilizado. A rede SOM foi formada por duas dimensões, taxa de aprendizado 0.01, valor mínimo de performance do gradiente de  $1e-5$ , valor máximo de épocas de treinamento de 1000 e tamanho inicial da vizinhança 10.

Para avaliar os métodos de classificação realizou-se testes em duas condições de corte, determinadas conjuntos  $a$  e  $b$ .

Resalta-se que os dados de treinamento e validação são diferentes, sendo 70% dos sinais para treinamento e 30% para validação. A mesma quantidade de dados foi mantida nas duas análises. Além disso, o treinamento e validação foram realizados 200 vezes para diferentes conjuntos de dados que foram criados aleatoriamente para cada teste a fim de confirmar a robustez do classificador. O resultado final foi a média das análises.

# 4 | PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

## 4.1 Processo de torneamento

Os testes foram realizados em um torno CNC, ROMI Multiplic-35D, com 11 kW de potência no motor principal e 20 kVA de potência instalada, com velocidade máxima no rotor de 3000 rpm. O material da peça utilizada no trabalho foi o aço AISI D6 com composição química: 2,10% C, 11,50% Cr, 0,70% W e 0,15% V.

As ferramentas utilizadas foram de PCBN, do fabricante Sandvik Coromant, classe CB7015, com 50% CBN e ligante cerâmico, com geometria SNGA120412 S01030A CB7015. A faixa de trabalho indicada pelo fabricante para a utilização da ferramenta na usinagem de aços endurecidos é velocidade de corte ( $V_c$ ) de 150-250 m/min, avanço ( $f$ ) 0,05 - 0,30 mm/rev. e profundidade de corte ( $a_p$ ) de 0,07 - 1,20 mm. As condições utilizadas são apresentadas na Tabela 2.

Conjunto	$V_c$	$a_p$	$f$
Conjunto (a)	200 m / min	0,2 mm	0,1 mm / rev
Conjunto (b)	150 m / min	0,1 mm	0,05 mm / rev

Tabela 2. Condições de corte.

Fonte: Autor (2020).

Situações típicas de desgaste envolvem mais de um tipo de desgaste, entretanto do ponto de vista de processo, o desgaste de flanco,  $V_b$ , é o mais importante, sendo a variável mais comum a ser utilizada para avaliação da condição da ferramenta, Liu et al. (2018a).

Seguindo as recomendações padrões de desgaste, definiu-se como critério de fim de vida útil quando  $V_b$  atingisse 0,30 mm. Para o conjunto (a), foram utilizadas 12 ferramentas, sendo 5 ferramentas em condição normal de desgaste, definida por  $V_b$  menor que 0,30 mm e 7 ferramentas com desgaste crítico, nas quais  $V_b$  era maior que 0,30 mm. Para o conjunto (b), utilizou-se 5 ferramentas, inicialmente novas, que foram utilizadas até a condição de desgaste crítico. Os ensaios foram realizados de maneira aleatória e as ferramentas utilizadas pertenciam a lotes distintos para evitar erros sistemáticos.

O desgaste de flanco medido após cada passe através da análise da superfície de folga em um estéreo microscópio, SZ61 - Olympus, com câmara digital integrada, com ampliação de 40 X. Antes de cada medição realizou-se a calibração do estéreo microscópio por meio de uma escala graduada. Para cada ferramenta inspecionada, foram realizadas três medições, obtendo a média dos valores, o que assegura a confiabilidade estatísticas das mesmas.

Em resumo, utilizou-se um total de 17 ferramentas no teste, considerando os conjuntos a e b, com os intervalos de desgaste de flanco sendo: desgaste normal [ $V_B = 0 - 0,30 \text{ mm}$ ] e desgaste crítico [ $V_B > 0,30 \text{ mm}$ ].

## 4.2 Aquisição dos sinais

Os acelerômetros foram fixados nas posições vertical (direção de corte) e horizontal (direção de avanço). Utilizou-se dois acelerômetros *Brüel & Kjær* com sensibilidades  $2,06 \text{ pC/m/s}^2$  e  $1,00 \text{ pC/m/s}^2$  conectados a dois amplificadores de carga *Brüel & Kjær* modelo 2635, e posteriormente a uma placa de aquisição de sinais da National Instruments, de 32 bits, 4 canais.

O sistema de monitoramento foi acoplado ao microcomputador, os dados foram coletados e salvos para posterior análise. O aparato experimental é apresentado na Figura 1.

Com base nas análises previamente desenvolvidas sobre o sistema, onde-se coletou sinais com frequências de amostragem maiores que a utilizada, verificou-se que com frequência de aquisição de  $25 \text{ kHz}$  e tempo de coleta de 11 segundos, o sinal de vibração abrangeria todas as excitações que poderiam influenciar no desgaste da ferramenta. Foram coletados 132 sinais de vibração, para o conjunto a e 115 sinais par o conjunto b.

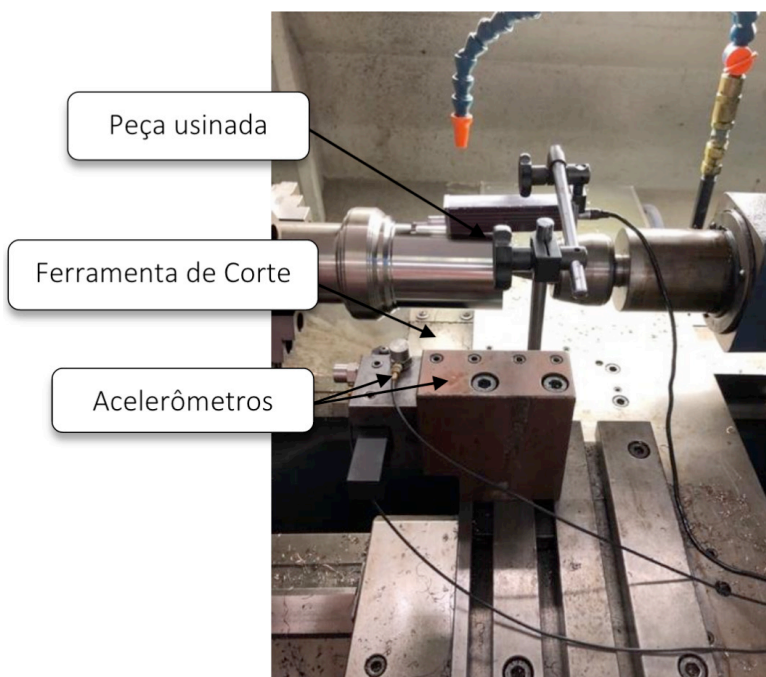


Figura 1. Montagem do aparato experimental.

Fonte: Autor (2020).

## 5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os sinais de vibração brutos no domínio do tempo e da frequência para a ferramenta aleatoriamente selecionada, podem ser observados na Figura 2, com um tempo total de coleta de 11 s, janela *hanning*, *overlap* de 50 % e *df* 6.10 Hz. Nessa etapa, tendo como objetivo apresentar somente o comportamento geral do sinal, não foram realizadas tratamento dos dados para plotagem das figuras. Posteriormente, esses processos foram realizados para extração dos parâmetros vibratórios.

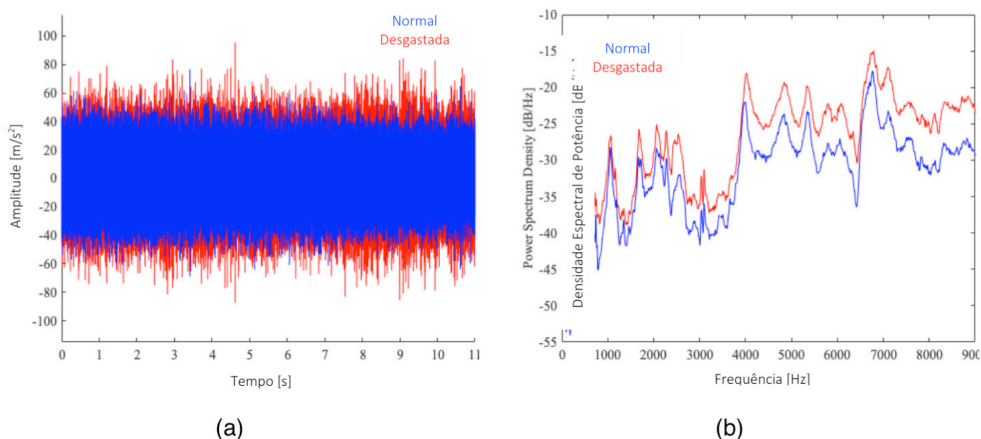


Figura 2. Sinal de vibração para ferramenta em estado normal  $V_B = 0,119$  e desgastada  $V_B = 0,353$ , no domínio do tempo (a) e frequência (b).

Fonte: Autor (2020).

Nota-se pela análise da Figura 2 (a) que existe um aumento da amplitude de vibração com o aumento do desgaste, ou seja, existe uma correlação entre as grandezas, assim como mostrado por Prasad e Babu (2017). Além disso, quando comparado duas ferramentas com grande diferença na condição de desgaste, esse aumento é visualmente perceptível. Nota-se também pela na Figura 2 (b) que algumas bandas de frequência apresentam maior correlação com o desgaste do que outras.

Os sinais de vibração brutos no domínio do tempo e da frequência para ferramentas com valores próximos de desgaste são mostrados na Figura 3.

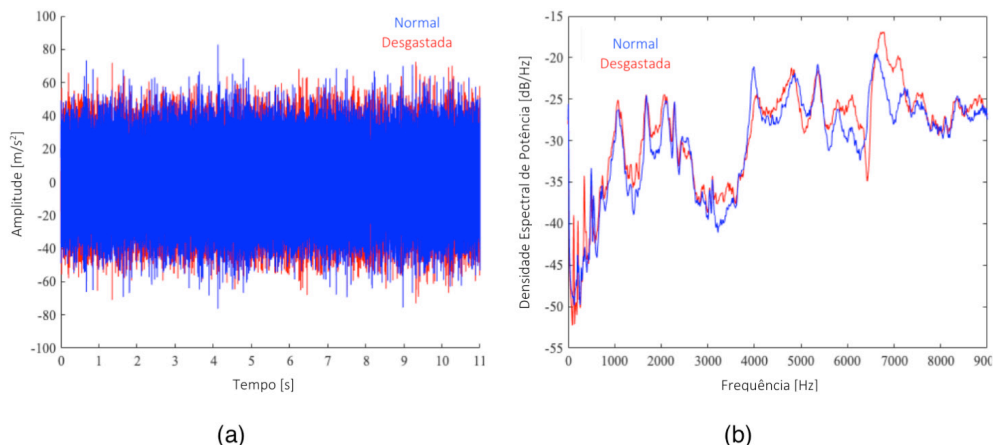


Figura 3. Sinal de vibração para ferramenta em estado normal  $V_B = 0,267$  e desgastada  $V_B = 0,321$ , no domínio do tempo (a) e frequência (b).

Fonte: Autor (2020).

Como pode ser visto, quando o desgaste das ferramentas se encontra muito próximo, é muito difícil classificar a condição da ferramenta apenas observando o sinal. Portanto, para definir o momento ideal da troca de forma automatizada, justifica-se a aplicação de uma técnica de inteligência artificial.

Primeiramente a fim de verificar, e evitar, a presença de valores extremos na amostra (*outliers*), utilizou-se o Teste de Grubbs. Dos testes realizados eliminou-se 5 sinais do conjunto a, resultando em um total de 127 sinais de vibração para o conjunto a, e 115 sinais de vibração para o conjunto b, já que nenhum sinal foi considerado *outlier* nesse conjunto.

Os parâmetros de vibração que melhor caracterizaram o problema em análise foram verificados através do Teste *t*. Após análises dos parâmetros mais relevantes, realizou-se uma varredura, para determinar quantos parâmetros seriam utilizados como dados de entrada nos classificadores. A varredura foi realizada testando combinações entre os 71 parâmetros definidos, e utilizando aquela que obteve maior taxa de acerto na classificação da ferramenta quanto ao desgaste. Os parâmetros utilizados, por sua vez, foram os que obtiveram maior *t-ratio*. Para o conjunto a utilizou-se três parâmetros, sendo: energia do sinal filtrado na banda de frequência de 500 a 3000 Hz, energia do envelope do sinal filtrado na banda de frequência de 6000 a 8000 Hz e energia do envelope do sinal com filtro passa baixo em 7000 Hz. Para o conjunto b, dois parâmetros: nível de energia do sinal filtrado na banda de frequência de 500 a 3000 Hz e energia do envelope do sinal filtrado na banda de frequência de 500 a 3000 Hz.

Analisando a classificação da condição das ferramentas obteve-se taxa de acerto (acurácia) de 92% para o conjunto *a* e 87% para o conjunto *b*. Além do valor de acurácia, a matriz de confusão para ambos os testes é apresentada na Tabela 3 e 4, respectivamente.

Valores Reais	Normal	88,2 %	11,8 %
	Desgastada	0,0 %	100 %
		Normal	Desgastada
		Valor Predito	

Tabela 3. Matriz de Confusão - Conjunto *a*.

Fonte: Autor (2020).

Valores Reais	Normal	100 %	0,0 %
	Desgastada	17,6 %	82,4 %
		Normal	Desgastada
		Valor Predito	

Tabela 4. Matriz de Confusão - Conjunto *b*.

Fonte: Autor (2020).

Por se tratar de um classificador não supervisionado, trabalhando com dados desbalanceados, as taxas obtidas pela rede SOM, foram consideradas satisfatórias, principalmente para o Conjunto *a*. A menor taxa de acerto obtida para o Conjunto *b*, pode ser justificado pelas condições de testes adotadas ao conjunto *b* que resultaram na maior quantidade de dados próximos a zona de transição entre desgaste normal e crítico, dificultando a análise pelo classificador.

Analisando a Tabela 3, pode-se verificar que no Conjunto *a* todas as ferramentas consideradas em condição de desgaste foram classificadas corretamente. Por outro lado, algumas ferramentas consideradas normais foram classificadas como desgastadas, implicando em um erro de classificação. Analisando os sinais correspondente aos 11,8% de erro, notou-se que 10,2% são relacionados a ferramentas com valor de desgaste medido entre 0,27 mm e 0,32 mm, os quais estão muito próximo da zona de transição, e que pode até mesmo, estarem associados a desvio de medição do desgaste no microscópio e não a um erro do classificador. Portanto, avalia-se que a precisão do método se encontra satisfatória. Os demais sinais (1,6 % do erro) foram considerados realmente erro de classificação por não apresentarem justificativa plausível. O fato de o classificador acertar todas as amostras em condição de desgaste permite uma segurança na operação, evitando que ferramentas fora das condições ideais operem, e consequentemente identificando o momento ideal de troca. Evitando também maiores danos que podem ser causados pela quebra da ferramenta durante a operação.



Avaliando o Conjunto **b**, Tabela 4, nota-se que todas as ferramentas em condição normal foram classificadas corretamente, implicando erros apenas na classificação das ferramentas com desgaste crítico. Novamente, analisando os sinais correspondente aos 17,6% de erro, notou-se que 15,1% são ferramentas com valor de desgaste medido entre 0,28 mm e 0,31 mm, os quais estão muito próximo da zona de transição e também podem estarem associados a desvio de medição do desgaste no microscópio e não a um erro do classificador. Concluindo também, que a precisão do método se encontra satisfatória. Em relação aos demais sinais (2,5 % do erro) não foram encontrados justificativas plausíveis.

Ressalta-se que caso as condições de operação, material e/ou máquina sejam diferentes das condições em que o classificador foi treinado é necessário treiná-lo novamente para as condições atuais. Afirma-se também, que apesar da necessidade de treinar novamente o sistema, isso não implica em uma limitação do método e sim em uma condição inicial de funcionamento.

## 6 | CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma metodologia não supervisionada utilizando dados desbalanceados para classificar o desgaste da ferramenta. Tendo como objetivo principal determinar se a ferramenta apresenta condição normal ou desgastada, e consequentemente o momento ideal de troca.

Duas diferentes condições de usinagem foram utilizadas a fim de validar o método, e diversos sinais de vibração coletados para monitorar o processo. Os parâmetros que melhor identificam as diferenças para a condição normal e desgastada foram extraídos com base nos testes estatísticos. Na metodologia proposta, utilizou-se uma rede neural SOM para identificação da condição de desgaste da ferramenta.

Nota-se que o sinal de vibração é capaz de caracterizar o desgaste da ferramenta, sendo uma boa técnica de monitoramento, confirmando os estudos apresentados na literatura. Além disso, através dos resultados obtidos, pode-se concluir que é possível utilizar somente o sensor de vibração, ao invés da combinação de vários outros sensores, o que implicaria em um aumento de custo para implementações industriais em grande escala.

Para este estudo, as faixas de frequência entre 500 a 3000 Hz e 6000 a 8000 Hz estão intimamente relacionadas a mudanças na condição da ferramenta. O nível de energia do envelope e o nível de energia do sinal filtrado são parâmetros que também se correlacionam bem com o desgaste da ferramenta.

Por fim, com uma taxa de acerto de até 92 %, mostra-se que a metodologia proposta pode ser utilizada para identificar o momento ideal de troca da ferramenta. A metodologia opera como um sistema de classificação do desgaste da ferramenta durante o processo de torneamento sem ser necessário parar o mesmo. Além disso, por se tratar de um sistema

não supervisionado, trabalhando com dados desbalanceados e apenas sensor de vibração, possibilita sua implementação no âmbito industrial. Ressalta-se a importância de realizar o treinamento do sistema para as condições de operação atual do equipamento.

## REFERÊNCIAS

Burnap, P., French, R., Turner, F., & Jones, K. (2018). **Malware classification using self organising feature maps and machine activity data.** *Computers & Security*, 73, 399–410.

Cai, Q., He, H., & Man, H. (2014). **Imbalanced evolving self-organizing learning.** *Neurocomputing*, 133, 258–270.

Grubbs, F. E. (1969). **Procedures for detecting outlying observations in samples.** *Technometrics*, 11(1), 1–21.

Hassana, M., Damirb, A., Attiaa, H., & Thomsona, V. (2018). **Benchmarking of pattern recognition techniques for online tool wear detection.** *Procedia CIRP*, 72, 1451–1456.

Kannatey-Asibu, E., Yum, J., & Kim, T. H. (2017). **Monitoring tool wear using classifier fusion.** *Mechanical Systems and Signal Processing*, 85, 651–661.

Kohonen, T. (1995). **Self-organizing maps** (2nd ed.). Berlin: Springer

Jain, D. K., Dubey, S. B., Choubey, R. K., Sinhal, A., Arjaria, S. K., Jain, A., et al. (2018). **An approach for hyperspectral image classification by optimizing SVM using self organizing map.** *Journal of Computational Science*, 25, 252–259

Lia, Z., Fang, H., Huang, M., Wei, Y., & Zhang, L. (2018). **Data-driven bearing fault identification using improved hidden Markov model and self-organizing map.** *Computers and Industrial Engineering*, 116, 37–46.

Liu, C., Li, Y., Hua, J., Lu, N., & Mou, W. (2018a). **Real-time cutting tool state recognition approach based on machining features in NC machining process of complex structural parts.** *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97, 229–241.

Liu, M., Takagi, J., & Tsukuda, A. (2004). **Effect of tool nose radius and tool wear on residual stress distribution in hard turning of bearing steel.** *Journal of Materials Processing Technology*, 150(3), 234–241.

Liu, Y., Wang, X., & Yan, K. (2018b). **Hand gesture recognition based on concentric circular scan lines and weighted K-nearest neighbor algorithm.** *Multimedia Tools and Applications*, 77, 209–223.

Lokesh, S., Kumar, P. M., Devi, M. R., Parthasarathy, P., & Gokulnath, C. (2019). **An automatic tamil speech recognition system by using bidirectional recurrent neural network with self-organizing map.** *Neural Computing and Applications*, 31, 1521–1531.

Lu, M., & Wan, B. (2013). **Study of high-frequency sound signals for tool wear monitoring in micromilling.** *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66, 1785–1792.

Mikaeil, R., Haghshenas, S. S., & Hoseinie, S. H. (2018). **Rock penetrability classification using artificial bee colony (ABC) algorithm and self-organizing map.** *Geotechnical and Geological Engineering*, 36, 1309–1318.

Mikołajczyk, T., Nowicki, K., Bustillo, A., & Yu Pimenov, D. (2018). **Predicting tool life in turning operations using neural networks and image processing.** *Mechanical Systems and Signal Processing*, 104, 503–513.

Mutheneni, S. R., Mopuri, R., Naish, S., Gunti, D., & Upadhyayula, S. M. (2018). **Spatial distribution and cluster analysis of dengue using self organizing maps** in Andhra Pradesh, India, 2011–2013. *Parasite Epidemiology and Control*, 3, 52–61.

Nouri, M., Fussell, B. K., Ziniti, B. L., & Linder, E. (2015). **Real- time tool wear monitoring in milling using a cutting condition independent method.** *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 89, 1–13.

Prasad, B. S., & Babu, M. P. (2017). **Correlation between vibration amplitude and tool wear in turning: Numerical and experimental analysis.** *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20, 197–211.

Rmili, W., Ouahabi, A., Serra, R., & Leroy, R. (2016). **An automatic system based on vibratory analysis for cutting tool wear monitoring.** *Measurement*, 77, 117–123.

Rizal, M., Ghani, J. A., Nuawi, M. Z., & Haron, C. H. C. (2017). **Cutting tool wear classification and detection using multi-sensor signals and Mahalanobis-Taguchi system.** *Wear*, 376–377, 1759–1765.

Sevilla, P., Robles, J., Jauregui, J., & Jimenez, D. (2015a). **FPGA-based reconfigurable system for tool condition monitoring in high-speed machining process.** *Measurement*, 64, 81–88.

Sevilla, P., Robles, J., Muñoz, J., & Lee, F. (2015b). **Tool failure detection method for high-speed milling using vibration signal and reconfigurable bandpass digital filtering.** *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81, 1187–1194.

Siddhpura, A., & Paurobally, R. (2013). **A review of flank wear prediction methods for tool condition monitoring in a turning process.** *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65, 371–393.

Silva, R. H. L., Silva, M. B., & Hassui, A. (2016). **A probabilistic neural network applied in monitoring tool wear in the end milling operation via acoustic emission and cutting power signals.** *Machining Science and Technology*, 20(3), 386–405.

Trent, E. M., & Wright, P. K. (2000). **Metal cutting** (4th ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.

Xie, Z., Li, J., & Lu, Y. (2019). **Feature selection and a method to improve the performance of tool condition monitoring.** *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100, 3197–3206.

Wang, C., Caja, J., & Gómez, E. (2018). **Comparison of methods for outlier identification in surface characterization.** *Measurement*, 117, 312–325.

Yen, C. L., Lu, M. C., & Chen, J. L. (2013). **Applying the self- organization feature map (SOM) algorithm to AE-based tool wear monitoring in micro-cutting.** *Mechanical Systems and Signal Processing*, 34, 353–366.

Zhou, Y., & Xue, W. (2018). **Review of tool condition monitoring methods in milling processes.** *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96, 2509–2523.

## METROLOGIA PARA ENGENHARIAS: CONSTRUÇÃO DE UM PROJETO METROLÓGICO PARA APLICAÇÃO DE CONCEITOS

*Data de aceite: 01/06/2021*

**Lisiane Trevisan**

Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia do Rio Grande do Sul  
Farroupilha – RS

**Daniel Antonio Kapper Fabricio**

Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia de Santa Catarina  
Chapecó – SC

**RESUMO:** A limitação de recursos para a construção de bancada didáticas no ensino superior gera a necessidade da criação de novas metodologias para disciplinas até então teóricas. Nesta ótica, este trabalho tem como objetivo a criação de uma metodologia de ensino para a disciplina de metrologia para o curso superior em engenharia mecânica. Para isso, este trabalho pretende mostrar uma prática aplicada dentro da disciplina de Metrologia, cujo nome é Projeto Metrológico. Este projeto proporciona a aplicação dos conceitos com base em medições realizadas pelos próprios alunos. As medições foram realizadas com base na escolha de um componente metálico que já tenha sido submetido a esforços mecânicos (rolamentos automotivos). As medições devem ser realizadas com a variação de diferentes parâmetros: instrumento de medição, técnicos e amostras. Com base nos resultados, os discentes foram orientados a determinar os erros de medição e o valor da incerteza de medição. Suas

conclusões devem estar voltadas a comparação dos valores de incerteza de medição e os valores verdadeiros convencionais e tolerância determinados inicialmente. Observou-se que melhorias devam ser realizadas para a aplicação desta metodologia nos próximos semestres, como o reforço na demonstração dos cálculos de incerteza de medição.

**PALAVRAS-CHAVE:** Metrologia, Educação para engenharia, Engenharia mecânica.

**ABSTRACT:** The limitation of resources for the construction of didactic benches in higher education generates the need to create new methodologies for previously theoretical disciplines. In this light, this work aims to create a teaching methodology for the discipline of Metrology in a higher course of mechanical engineering. For this, this work intends to show an applied practice, named Metrological Project, within the discipline of Metrology. This project provides the application of concepts based on measurements made by the students themselves. The measurements were made based on the choice of a metallic component that had already been subjected to mechanical stresses (automotive bearings). Measurements were performed by varying different parameters: measuring instrument, technicians and samples. Based on the results, students were oriented to perform the determination of measurement errors and measurement uncertainty. Their conclusions aimed at the comparison of the measurement uncertainty values and the conventional true values and tolerance initially determined. It was observed that improvements should be made for

the application of this methodology in the next semesters, such as the reinforcement in the demonstration of the measurement uncertainty calculations.

**KEYWORDS:** Measurement, Education in engineering, Mechanical engineering.

## 1 | INTRODUÇÃO

Metrologia é a ciência que trata das medições como um todo, abrange todos os aspectos teóricos e práticos relativos às medições (INMETRO, 2012). A metrologia está presente em diferentes áreas da ciência, desde a medição de massa quando compramos maçãs na feira, quando abastecemos carro com combustível até grandes valores como a construção de um mapa geológico (FARUOLO, 2005).

A educação é uma ciência em constante transformação, e na contemporaneidade ela passa por novos desafios. Em 2003, Libâneo já sugeria algumas atitudes docentes necessárias diante da realidade do mundo contemporâneo, entre as quais pode-se mencionar a aprendizagem ativa e ensino como mediação e saber utilizar as novas tecnologias (LIBÂNEO, 2003).

Segundo Moran (2015), as escolas estão mudando para modelos mais centrados em aprender ativamente com problemas reais, desafios relevantes, jogos, atividades e leituras, valores fundamentais, combinando tempos individuais e tempos coletivos; projetos pessoais de vida e de aprendizagem e projetos em grupo. A tendência é priorizar o envolvimento maior do aluno, com metodologias ativas como o ensino por projetos de forma mais interdisciplinar, o ensino híbrido e a sala de aula invertida.

Atualmente, na educação, a tendência é priorizar o envolvimento maior do aluno, com metodologias ativas de aprendizagem e o ensino híbrido, contemplando os avanços tecnológicos recentes, de forma especial as tecnologias de informação e comunicação (LEITE, 2014).

Um dos desafios da atualidade é ensinar conceitos teóricos de uma forma diferente da metodologia tradicional de ensino, ou seja, ensinar através do uso de conceitos dentro de aplicações práticas. Mas, como criar uma metodologia de forma eficiente?

Podem ser utilizadas plataformas digitais para isso, mas esse trabalho busca um objetivo maior: fixação e aplicação dos conceitos de metrologia dentro das áreas de qualidade e controle de qualidade, aliada à melhoria de resultados com o uso de conceitos da estatística dentro de projetos práticos de aplicação industrial.

Assim, o objetivo deste trabalho é apresentar uma prática didática criada para a aplicação dos conceitos teóricos de metrologia (tais como sistema de medição, calibração, determinação de erros e calibração) dentro de um exercício prático nas aulas de metrologia do curso de engenharia mecânica do campus Farroupilha do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS).

## 2 | METODOLOGIA APLICADA

Para o desenvolvimento do trabalho foram determinadas algumas regras iniciais para que o processo de medição fosse transcorrido de uma forma uniforme, assim todos os alunos possuíam as mesmas ferramentas para o desenvolvimento do trabalho.

Inicialmente, na primeira aula do semestre, ocorre a escolha do componente que será usado para a prática educacional. Várias turmas escolheram diferentes materiais, desde estudo metrológico de lápis de cor, pistão automotivo e dobradiça de porta. A escolha está focada na disponibilidade destes componentes para que o grupo possa adquirir/buscar estes componentes a baixo custo.

Para o desenvolvimento do projeto, foi determinado inicialmente que os grupos deveriam ser formados com 2 alunos e 3 peças com mesmas características mecânicas. Grupos com grande número de alunos prejudica a distribuição de tarefas, sendo apenas um aluno sobrecarregado (em grande maioria dos casos) e um grande número de peças também onera um tempo muito grande para a realização das medidas que precisam serem feitas.

A escolha de três peças de um mesmo tipo justifica-se para possibilitar a comparação entre os indivíduos e os instrumentos, além da comparação entre as medidas obtidas pelas diferentes amostras entre si. Esta comparação é fundamental para a aplicação de conceitos como erros de medição e a estimativa da incerteza de medição.

Então, a sequência da metodologia aplicada a este projeto está resumida nas seguintes etapas:

- Apresentação dos conceitos teóricos em conjunto com o andamento do projeto metrológico;
- Definição dos parâmetros do projeto metrológico – com escolha do componente que será usado no projeto;
- Escolha do instrumento de medição mais adequado – escolha realizada pelo grupo de alunos;
- Calibração dos instrumentos de medição que serão usados no projeto metrológico;
- Realização das medidas dos componentes metálicos escolhidos;
- Cálculo estatístico: média, desvio-padrão e construção de histograma dos valores medidos;
- Estimativa de fontes de erro e cálculo da incerteza de medição conforme orientações do professor;
- Elaboração do relatório final – ao longo do semestre e entrega do relatório final;
- Apresentação oral do projeto final para a turma;

O projeto foi avaliado com base em duas avaliações: relatório escrito e apresentação oral pelo grupo de alunos para a turma do semestre. O relatório escrito foi construído

com o auxílio do docente ao longo das aulas do semestre e assim, o desenvolvimento do trabalho foi realizado acompanhando ao longo das etapas. A apresentação oral auxilia no desenvolvimento da capacidade de síntese de um projeto, assim os alunos precisam treinar a síntese de um projeto desenvolvido ao longo de meses a ser realizado no tempo estipulado de 15 minutos.

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

O componente escolhido para a apresentação dos resultados está focado no estudo dimensional de um componente automotivo (rolamento), conforme descrito na Figura 1.

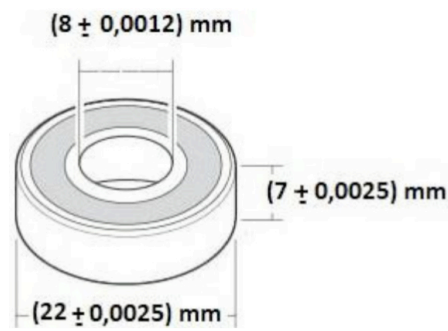


Figura 1 - Demonstração do rolamento automotivo escolhido pelos grupos da turma 2019 – primeiro semestre. Desenho inclui cotas e tolerâncias. Medidas em milímetros.

Conforme demonstrado na Figura 1, o componente metálico escolhido possui um número grande de características de qualidade as quais precisam ser monitoradas dentro do processo produtivo para que o mesmo obtenha garantia deste produto.

Neste projeto metrológico, o docente permite que cada grupo determine, conforme sua experiência e vivência industrial, que sejam estabelecidas as variáveis (características da qualidade) as quais o grupo considere como importante. Os valores de referência (valor verdadeiro convencional) e sua tolerância também serão descritos pelos alunos.

Para o projeto metrológico do primeiro semestre de 2019, os parâmetros e seus valores estão descritos na Tabela 1 conforme a descrição individual de cada grupo.



Grupo	Parâmetro 1	Parâmetro 2	Parâmetro 3
A	Espessura $7,000 \pm 0,0025 \text{ mm}$	Diâmetro Interno $8 \pm 0,0012 \text{ mm}$	Diâmetro Externo $22 \pm 0,0025 \text{ mm}$
B	Altura $16 \text{ mm} \pm 15\mu\text{m}$	Diâmetro Interno $30 \text{ mm} -13\mu\text{m}$	Diâmetro Externo $62 \text{ mm} + 13\mu\text{m}$
C	Altura $23,40 \text{ mm}$	Diâmetro Interno $40 \text{ mm}$	Diâmetro Externo $90,8 \text{ mm}$
D	Altura $23,80 \pm 0,05 \text{ mm}$	Diâmetro Interno $30,00 \pm 0,05 \text{ mm}$	Diâmetro Externo $62,00 \pm 0,05 \text{ mm}$

Tabela 1 - Parâmetros escolhidos pelos alunos para o desenvolvimento do projeto metrológico.

Conforme mostrado na Tabela 1, os rolamentos usados por cada grupo foram diferentes entre si, ou seja, rolamento com diferentes usos. A única exigência é que os componentes que o grupo irá trabalhar devam ter mesmas especificações, além disso, os mesmos deveriam ser usados ou terem sido submetidos a esforços mecânicos.

A Tabela 1 mostra que as cotas escolhidas para a realização do estudo metrológico foram praticamente as mesmas, espessura/altura, diâmetro interno e diâmetro externo.

Observa-se que o grupo C não estipulou qualquer tolerância do produto pronto, o que é um problema e o mesmo foi verificado apenas na entrega dos relatórios escritos, devido ao atraso das atividades. Nota-se também que não há uma uniformidade do número de casas decimais, com exceção do grupo D, sendo que algumas nem apareceram no valor nominal caso B e C, o que mostra o desconhecimento do conhecimento relacionado a algarismos significativos, conteúdo abordado no início do curso de graduação, mas há dificuldades na aplicação dos conceitos. Além disso, o grupo B misturou medidas em milímetros e micrômetros, o que também é um erro do ponto de vista da Metrologia.

A partir das cotas declaradas com suas respectivas tolerâncias, os grupos iniciaram a realização das medidas. Como o objetivo desta disciplina é a interpretação das medidas e o que fazer com as mesmas, lidar com esse desafio faz parte das atividades de um engenheiro mecânico. Fica bem claro deste o início da disciplina que poucos engenheiros têm pela frente o desafio de realizar medidas ao longo de sua jornada profissional, grande maioria trabalha com valores medidos por outros técnicos ou departamentos dentro da empresa e, a partir dos valores medidos, precisam tomar medidas com esses valores.

A segunda etapa do projeto foi a escolha do instrumento de medição mais adequado, escolhido pelo grupo. Nesta etapa, a resolução do equipamento e suas características devem ser avaliadas pelo grupo e o docente permite que cada grupo realize a sua escolha e justifique sua escolha no relatório escrito. Ressalta-se que mesmo que os conceitos teóricos tenham sido previamente apresentados, os grupos em grande parte acabam realizando uma escolha que não abrange as tolerâncias apresentadas inicialmente.

### 3.1 Calibração

De acordo com o Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM), calibração pode ser definida como:

“Operação que estabelece, sob condições especificadas, numa primeira etapa, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas; numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção dum resultado de medição a partir duma indicação” (INMETRO, 2012, p. 27).

Dentro do procedimento de calibração são tratados outros conceitos como rastreabilidade e sistema de medição. Estes conceitos muitas vezes não são compreendidos em sua integralidade.

Como os instrumentos de medição existentes no campus Farroupilha do Instituto Federal do Rio Grande do Sul não estão calibrados, e além disso, mostra-se a necessidade da realização da calibração dentro do projeto metrológico.

A etapa subsequente à escolha do instrumento é a realização da calibração do mesmo com o sistema metrológico e recursos internos ao sistema. O processo de calibração deverá ser feito com a comparação dos valores medidos no instrumento de medição com os valores indicados por um conjunto de blocos-padrão. Os valores de erro de medição calculados para os instrumentos de medição usados por cada grupo estão especificados pela Tabela 2.

Grupo	Calibração – Instrumento de Medição 1	Calibração – Instrumento de Medição 2
A	A calibração foi realizada para apenas um bloco-padrão. Erro de +0,015 mm Erro zero = zero	A calibração foi realizada para apenas um bloco-padrão. Erro de +0,015 mm Erro zero = zero
B	A etapa de calibração foi realizada, porém o valor do erro foi determinado como zero.	A etapa de calibração foi realizada, porém o valor do erro foi determinado como zero.
C	Não realizou a etapa de Calibração dos instrumentos de medição.	Não realizou a etapa de Calibração dos instrumentos de medição.
D	Realizou a calibração do instrumento para 3 blocos-padrão com os valores de erro: 20 mm = 0,00 mm 30 mm = 0,00 mm 60 mm = -0,05 mm	Realizou a calibração do instrumento para 3 blocos-padrão com os valores de erro: 20 mm = +0,05 mm 30 mm = 0,00 mm 60 mm = +0,05 mm

Tabela 2 – Calibração para cada um dos dois instrumentos usados.

Na Tabela 2, o erro do instrumento indica a diferença entre o valor medido e o valor de referência do bloco padrão. É possível observar que mesmo que a aula teórica tenha sido a mesma para a turma de alunos, cada grupo procedeu da forma que achou

mais adequado. Se for comparado entre os 4 grupos, cada um deles procedeu de forma independente e diferente entre si.

Ainda assim, para compor o erro relacionado à calibração do instrumento, fonte de incerteza para o cálculo do valor da incerteza de medição, esta fonte de incerteza foi considerada como sendo o erro relacionada à calibração mais o erro do zero (valor marcado quando o instrumento é posicionado no valor zero, início da escala). O que foi executado apenas pelo grupo A.

### 3.2 Realização das medições

Após a realização da calibração dos instrumentos de medição, os rolamentos passaram por limpeza. Depois de limpos, foram realizadas as medidas das características da qualidade conforme descrito na Tabela 1.

A orientação inicial era que para cada característica da qualidade escolhida, o grupo deveria realizar as medidas para cada um dos alunos e para cada um dos dois instrumentos de medição, repetindo as medidas de cada condição 5 vezes. Assim, os grupos deveriam realizar as medidas da seguinte forma:

- Aluno 1 – instrumento de medição 1 – controle de qualidade 1;
- Aluno 1 – instrumento de medição 1 – controle de qualidade 2;
- Aluno 1 – instrumento de medição 1 – controle de qualidade 3;
- Aluno 1 – instrumento de medição 2 – controle de qualidade 1;
- Aluno 1 – instrumento de medição 2 – controle de qualidade 2;
- Aluno 1 – instrumento de medição 2 – controle de qualidade 3;
- Aluno 2 – instrumento de medição 1 – controle de qualidade 1;
- Aluno 2 – instrumento de medição 1 – controle de qualidade 2;
- Aluno 2 – instrumento de medição 1 – controle de qualidade 3;
- Aluno 2 – instrumento de medição 2 – controle de qualidade 1;
- Aluno 2 – instrumento de medição 2 – controle de qualidade 2;
- Aluno 2 – instrumento de medição 2 – controle de qualidade 3;

Devido à extensão de dados gerados com esta combinação de parâmetros, os valores não serão apresentados neste trabalho. Mas ressalta-se que o objetivo principal na geração destes dados foi a comparação entre os valores medidos para diferentes alunos, instrumentos de medição e controle de qualidade. Nem todos os grupos mostraram interesse na realização de todas as combinações, tampouco na interpretação dos dados gerados nestas medições.

### 3.3 Incerteza de Medição

O processo de calibração realizado nos instrumentos de medição garante os valores de incerteza de medição calculados para as medidas realizadas nos componentes. Assim a calibração com rastreabilidade indicada reduz os erros e aumenta a confiabilidade dos valores medidos (FERNANDEZ, 2009).

Após realizar as medidas, os grupos foram orientados a estimar a incerteza de medição, que pode ser definida como um “parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas” (INMETRO, 2012, p. 24).

O método de cálculo apresentado aos alunos deveria considerar apenas duas fontes de incerteza de medição: fonte relacionada a calibração dos instrumentos usados e a fonte relacionada ao desvio padrão das medições realizadas. Limitar o número de fontes de incerteza tem o objetivo de simplificar a realização dos cálculos. A Tabela 3 apresenta os valores de incerteza de medição.

Grupo Parâmetro	A	B	C	D
Espessura/ Altura	7,02 ± 0,056 mm	16,02 ± 0,07 mm	Não foi determinado	23,78 ± 0,09 mm
Diâmetro Interno	8,00 ± 0,056 mm	29,98 ± 0,07 mm	Não foi determinado	30,00 ± 0,09 mm
Diâmetro Externo	22,01 ± 0,056 mm	62,04 ± 0,07 mm	90,75 ± 0,0108 mm	62,00 ± 0,09 mm

Tabela 3 – Valores de incerteza de medição calculados para cada grupo.

Ressalta-se que mesmo demonstrando o método de cálculo para o valor de incerteza de medição, os valores são significativamente diferentes entre si, quando observado a ordem de grandeza. Todos os grupos analisados utilizaram mesmo tipo de instrumento de medição e com mesma resolução, o que demonstra mais uma vez falta de conhecimento para Algarismos Significativos. Por exemplo, um instrumento de medição com resolução para dois algarismos não pode fornecer incerteza de medição para quatro algarismos significativos.

O grupo C não realizou o estudo metrológico para as cotas espessura/altura e diâmetro interno alegando falta de tempo para o desenvolvimento do projeto, o que não ocorreu com os demais grupos (A, B e D). Isso leva a crer que o grupo não soube distribuir as atividades ao longo do semestre letivo.

Observa-se, na Tabela 3, que alguns dos valores médios foram expressos como inteiros, o que indica que os alunos podem ter (erroneamente) arredondado alguns dos valores médios. Foi ressaltado que o importante não apresentar os valores medidos que sejam exatos aos valores teóricos (VVC).

Durante a apresentação final do projeto metrológico, foram argumentadas as diferenças e semelhanças entre os valores teóricos e os valores obtidos nas médias dos valores medidos. Muitos grupos não souberam explicar as diferenças, e os argumentos para explicação foram vários como: “a diferença deve estar focada no instrumento de medição que é diferente ao instrumento de medição que o fabricante de rolamentos usa”, outro grupo comentou que “não sabíamos usar o instrumento de medição e isso pode ter causado erros de medida”, e até outros comentários mais coerentes com a realidade “por se tratar de um rolamento usado, por isso encontramos incerteza de medição tão baixa”.

Comparando os valores de incerteza de medição com os valores descritos inicialmente como VVC (Valor Verdadeiro Convencional) e sua tolerância, a finalização do projeto metrológico precisa responder ao seguinte questionamento: os valores estabelecidos inicialmente para cada cota foram determinados na prática?

Assim, os valores determinados na Tabela 1 e a Tabela 3 foram então apresentados pelos alunos e assim eles deveriam classificar entre “APROVADO”, onde os valores experimentais encontram-se dentro do intervalo teórico; e “NÃO APROVADO”, para quando não abrangem os critérios “APROVADO”.

Para todos os critérios de controle de qualidade para todos os grupos, os valores obtidos experimentalmente não foram aprovados. Todos os grupos usaram do mesmo argumento para justificar a não aprovação: o valor da incerteza de medição é maior que o valor da tolerância estipulada anteriormente, o que é um equívoco. Também argumentaram que posteriormente a todas as medidas realizada, foi possível observar que a o instrumento de medição escolhido não possuía a resolução exigida para a obtenção da tolerância, o que também mostra desconhecimento dos alunos.

## 4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia apresentada por este trabalho mostrou-se importante quando focado no desenvolvimento do aluno, os alunos mostraram mais interessados pelo assunto, devido à aplicação dos conceitos teóricos apresentados na etapa teórica da disciplina.

De um modo geral, a metodologia aplicada à turma de metrologia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Farroupilha apresentou-se satisfatória, dentro do planejado.

Ressalta-se que melhorias na metodologia mostrada precisam ser realizadas, quando focamos no desenvolvimento do projeto ao longo do semestre, mesmo com o acompanhamento do docente, em muitas vezes, os discentes não entregam as atividades parciais alegando grande número de desculpas e assim, acarretando no atraso de etapas e na não conclusão de algumas tarefas, como a etapa de calibração.

Outra importante melhoria que deverá ser realizada nos próximos semestres está focada na apresentação dos exemplos práticos e variados da aplicação da incerteza de medição. Os grupos não conseguiram realizar essa etapa de modo satisfatório. Na

apresentação de dois grupos, os valores apresentados no projeto estavam idênticos a exemplos aplicados em sala de aula, valores que não se aproximaram aos valores medidos.

Outro fator a ser destacado é a comparação entre os valores de incerteza de medição e os valores de tolerância, a comparação entre os valores, a qual foi realizada de modo insatisfatório. Todos os 4 grupos alegaram que se os valores de incerteza de medição e os de tolerância determinados inicialmente fossem distintos, o processo de medição usado e os componentes mecânicos não seriam aprovados dentro de um processo produtivo, o que é um equívoco.

Busca-se nos próximos trabalhos novas formas de aplicação de conceitos aplicados a metrologia, em que hajam interdisciplinaridade com outras disciplinas do curso de engenharia mecânica, assim podendo mostrar a aplicação de conceitos não só dentro da própria disciplina, mas em outras áreas de abrangência do curso.

## REFERÊNCIAS

FARUOLO, L. B.; FERNANDEZ, J. L. **A importância do ensino de metrologia, com foco na incerteza de medição, na formação de engenheiros**. XXXIII Congresso Brasileiro do Ensino de Engenharia – COBENGE. Paraíba. 2005.

FERNANDEZ, Wilson D. et al. **Metrologia e qualidade – sua importância como fatores de competitividade nos processos produtivos**. XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção. A Engenharia de Produção e o Desenvolvimento Sustentável: Integrando Tecnologia e Gestão. Salvador, BA, Brasil, 2009.

INMETRO. Portaria n.º 232, de 08 de maio de 2012: **Vocabulário Internacional de Metrologia – Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012)**. Disponível em: <. Acesso em 06 abr. 2020.

LEITE, W. S. S. **Sociedade moderna e tecnologias na educação: Reflexões e perspectivas sobre a realidade no Brasil**. Revista Liberato, Novo Hamburgo, v. 15, n. 24, p. 105-212, jul./dez. 2014.

LIBÂNEO, J. C. **Adeus professor, adeus professora?: Novas exigências educacionais e profissão docente**. 7. ed. São Paulo: Cortez, 2003.

MORAN, J. **Mudando a educação com metodologias ativas**. Coleção Mídias Contemporâneas, v. II, 2015.

## POTENCIAL ECONÔMICO E ENERGÉTICO DO APROVEITAMENTO DO CALOR REJEITADO POR CONDICIONADORES DE AR

Data de aceite: 01/06/2021

Data de submissão: 08/03/2021

### **David Coverdale Rangel Velasco**

Universidade Estadual do Norte Fluminense  
Darcy Ribeiro  
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro  
<http://lattes.cnpq.br/9356476964884212>

### **José Alexandre Tostes Linhares Júnior**

Universidade Estadual do Norte Fluminense  
Darcy Ribeiro  
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro  
<http://lattes.cnpq.br/9046803786078806>

### **Felipe Perissé Duarte Lopes**

Universidade Estadual do Norte Fluminense  
Darcy Ribeiro  
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro  
<http://lattes.cnpq.br/1944239448019813>

### **Carlos Maurício Fontes Vieira**

Universidade Estadual do Norte Fluminense  
Darcy Ribeiro  
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro  
<http://lattes.cnpq.br/6309884585355966>

### **Afonso Rangel Garcez de Azevedo**

Universidade Estadual do Norte Fluminense  
Darcy Ribeiro  
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro  
<http://lattes.cnpq.br/5332016516191423>

**RESUMO:** Pesquisas apontam um crescimento exponencial da demanda de energia per capita, no decorrer da história. Mediante este cenário,

cresce a necessidade por estudos que tenham por objetivo otimizar a utilização da energia pela sociedade, possuindo impactos econômicos e socioambientais positivos. O presente trabalho, utilizou dados oficiais atualizados, para realizar um estudo do potencial aproveitamento energético do calor dissipado por condicionadores de ar, objetivando assim um ganho econômico pautado no desenvolvimento sustentável. Parâmetros como carga térmica, eficiência energética, trabalho e calor rejeitado foram utilizados, bem como detalhamento de tarifas envolvidas no custo de energia atualmente. O estudo arbitrou percentuais de aproveitamento, como 25, 50, 75 e 100% da energia dissipada e concluiu que existe um real potencial de aproveitamento da energia. Ressalta-se ainda que a quantidade de calor liberada pelo ar condicionado está mais associada a carga térmica do ambiente refrigerado do que eficiência do mesmo. Assim, mesmo que sejam desenvolvidos aparelhos mais eficientes não seria expressiva a redução da quantidade de calor rejeitada, visto a maior parte provem da energia que é retirada do ambiente refrigerado.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ar condicionado, eficiência energética, energia, sustentabilidade.

### **ECONOMIC AND ENERGY POTENTIAL FOR THE USE OF HEAT REJECTED BY AIR CONDITIONERS**

**ABSTRACT:** Research shows an exponential growth in the demand for energy per capita, throughout history. Against this backdrop, there is a growing need for studies that aim to optimize the use of energy by society, with positive economic

and socio-environmental impacts. The present work used updated official data to conduct a study of the potential energy use of the heat dissipated by air conditioners, thus aiming at an economic gain based on sustainable development. Parameters such as thermal load, energy efficiency, work and rejected heat were used, as well as details of tariffs involved in the cost of energy today. The study arbitrated utilization percentages, such as 25, 50, 75 and 100% of the energy dissipated and concluded that there is a real potential for using the energy. It should also be noted that the amount of heat released by the air conditioner is more associated with the thermal load of the refrigerated environment than its efficiency. Thus, even if more efficient devices are developed, the reduction in the amount of heat rejected would not be significant, since most of it comes from the energy that is removed from the refrigerated environment.

**KEYWORDS:** Air conditioning, energy efficiency, energy, sustainability.

## 1 | INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da raça humana está diretamente relacionado com a energia demandada sociedade. Assim, desde o início da humanidade até a atualidade, a demanda de energia per capita cresceu cerca de 130 vezes. Segundo Goldemberg (1998), em países mais desenvolvidos o consumo anual é superior 2 Toneladas Equivalente de Petróleo (TEP) per capita, sendo uma barreira essencial para o desenvolvimento em países subdesenvolvidos ultrapassar o consumo de 1 TEP/capita. Acrescenta-se ainda que em países subdesenvolvidos a expectativa de vida é 30% menor, a mortalidade infantil é mais do que três vezes superior aos países industrializados e o analfabetismo supera 20%.

No Brasil, estima-se que a demanda de energia elétrica cresça em 3,6% ao ano na próxima década. Espera-se que esta demanda resulte numa maior participação de termoeletricas na matriz energética (ISTOÉ DINHEIRO, 2019). Assim, mesmo com o crescimento da utilização de fontes renováveis, somente as mesmas não serão suficientes para atender as demandas de energia elétrica da sociedade. Outro efeito de uma maior participação das termoeletricas está associado ao custo de geração de energia pelas mesmas que tende a tornar o valor mais alto da energia elétrica brasileira.

Neste sentido, a importância da utilização de métodos com melhor aproveitamento energético tem sua importância associada tanto a aspectos econômicos, quanto a aspectos socioambientais. Numa perspectiva global, a *Energy Information Administration* (EIA, 2019) estima que o consumo de energia elétrica aumente em aproximadamente em 50% até 2050. A *International Energy Agency* (IEA, 2018) prevê que o uso de ar-condicionado será um dos principais itens da demanda global por eletricidade, triplicando sua demanda de energia até 2050.

Neste sentido, o IEA destaca a importância de estabelecer padrões mínimos globais para a eficiência de ares condicionados. Estima-se que o benefício financeiro desta medida, seria uma economia de US\$ 2,9 trilhões em investimentos, combustíveis e custos operacionais, o que demonstra um grande potencial de economia dos sistemas de condicionamentos de ambientes; uma vez que sua eficiência varia muito de produto para



produto e a escolha adequada pode aumentar consideravelmente a rentabilidade de uma empresa (IEA, 2018).

Além do emprego de equipamentos eficientes, a utilização do calor rejeitado por condicionadores de ambientes são outra vertente que pode reduzir a quantidade de energia de energia elétrica utilizada. Neste sentido, Alves (2016) aponta que esse tipo de energia pode ser aproveitada de diversas formas como: descongelamento, secagem, aquecimento de ambientes, piscinas, pisos radiantes, bem como aquecimento e preaquecimento de fluidos de processos.

Neste sentido, este trabalho avalia o potencial do calor gerado e não aproveitado por ares condicionados como substituto ao aquecimento por resistência elétrica. Desta forma foi possível estimar a quantidade de energia elétrica que pode ser economizada, bem como qual o impacto financeiro que esta economia pode gerar.

## **2 | MATERIAIS E MÉTODOS**

A seguir será apresentada a metodologia deste trabalho. A mesma apresenta os procedimentos adotados para estimar a quantidade de energia que é liberada nos condensadores de ares condicionados, bem como seu potencial de utilização de acordo com a eficiência e aproveitamento da mesma. Avaliou-se também os potenciais ganhos econômicos que o aproveitamento desta energia pode resultar.

### **2.1 Banco de dados**

A metodologia deste trabalho consiste numa avaliação do potencial de utilização da energia rejeitado por ares condicionados por meio dos dados disponíveis no Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO). Os dados utilizados estão disponíveis aos consumidores no site do INMETRO na seção de Tabelas de consumo/eficiência energética, sendo a versão utilizada neste trabalho referente a que foi publicada no dia 02 de julho de 2020. Os condicionadores que não possuem informações sobre a eficiência energética não foram utilizados neste trabalho, diante disto a amostra utilizada foi composta por 714 ares condicionados.

A Tabela 1 apresenta os valores máximos e mínimos da carga térmica e eficiência energética, assim como a média e mediana dos valores encontrados na amostra supracitada.

	Carga térmica (BTU/h)	Eficiência energética (W/W)
Máximo	60000	4,01
Média	26265	3,21
Mínimo	7000	2,65
Mediana	22000	3,24

Tabela 1. Consolidação da amostra de dados utilizada.

Fonte: INMETRO (2020).

## 2.2 Potencial de economia energético

Para a realização deste trabalho foram considerados três cenários de aproveitamento do calor rejeitado, que são, 25, 50, 75 e 100%; bem como a eficiência máxima, mínima e média encontrada no banco de dados. Visando facilitar a comparação entre resultados em função das eficiências de diferentes equipamentos, considerou-se para todas as eficiências uma carga térmica igual a mediana da amostra utilizada neste trabalho (22.000 BTU/h). Considerou-se também o funcionamento do ar condicionado em plena carga, uma hora por dia, no decorrer do período de um ano, ou seja, 365 horas de funcionamento.

O trabalho necessário para movimentar o fluido ( $W$ ) quando o ar condicionado está em plena carga foi calculado de acordo com a Eficiência Energética (EE) e Carga Térmica (CT) do ar condicionado por meio da Equação 1. Já a quantidade de Calor Rejeitado por hora (CR) foi determinada por meio da Equação 2.

$$W = \frac{C_T}{E_E} \quad (1)$$

$$C_R = C_T + W \quad (2)$$

## 2.3 Potencial de economia financeiro

A quantidade de energia economizada depende não só do valor base estabelecido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para as concessionárias, mas também das condições de geração (bandeira tarifária) e os impostos. Assim, partes destas variáveis dependem da região a ser estudada, sendo necessário desta forma realizar um recorte geográfico. Neste trabalho, foi utilizado como referência o município de Campos dos Goytacazes, localizado na região norte do Estado do Rio de Janeiro.

O valor da tarifa base cobrado pela concessionária depende da classe de consumo. Neste trabalho, utilizou-se como referência a classe residencial, visto que é a classe com maior consumo cativo, 44,7%, segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2020). Assim, considerou-se neste trabalho o valor da tarifa base igual a R\$ 683,67/MWh. Isto é, o valor cobrado em Campos dos Goytacazes para consumidores residenciais

normais (B1) sem a incidência de impostos e acréscimos referentes a bandeira tarifária (ANEEL, 2020).

O valor a ser acrescentado pela bandeira tarifária varia mensalmente de acordo com as condições de geração de energia. A Tabela 2 apresenta os valores a serem acrescentados na tarifa base de acordo com as condições de geração de energia, bem como a média ponderada destes valores, cujo o peso foi igual a quantidade de meses que cada bandeira ficou vigente em 2018 e 2019. Devido as excepcionalidades geradas pela COVID 19, o ano de 2020 teve a bandeira verde fixada pela ANEEL e por este motivo foi desconsiderado.

BANDEIRA	VALOR	QUANTIDADE
Verde	R\$ 0,00	10
Amarela	R\$ 13,43	6
Vermelha - p1	R\$ 41,69	3
Vermelha - p2	R\$ 62,43	5
Média ponderada	R\$ 21,575	-

Tabela 2. Bandeiras tarifárias.

Fonte: ANEEL (2020).

Os impostos que incidem sobre a tarifa de energia podem ser divididos em estaduais e federais. O Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) é um imposto estadual cuja a alíquota varia de acordo com o consumo. A alíquota utilizada do Estado do Rio de Janeiro pode ser observada na Tabela 3. Neste trabalho utilizou como alíquota de ICMS 18%, visto que não só o consumo médio das residências do Rio de Janeiro, mas de todos os Estados do Brasil estão dentro dessa faixa (EPE, 2020).

FAIXA	ALÍQUOTA
0 a 50 kwh	0%
51 a 299 kwh	18%
300 a 450 kwh	31%
450 kwh ou superior	32%

Tabela 3. Alíquotas de ICMS do Estado do Rio de Janeiro incidentes sobre a energia elétrica.

Fonte: Rio de Janeiro (1996, 2002, 2017).

Já o Programa de Integração Social (PIS) e Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (COFINS) são impostos federais que cujo valor varia mensalmente de forma não previsível. Assim, considerou-se neste trabalho o valor do PIS e CONFINS como uma média do valor que foi cobrado em 2019 e 2018, 4,69%. Devido a excepcionalidades que a COVID 19 pode ter causado na alíquota destes impostos, o ano de 2020 não foi contabilizado.

O valor da tarifa final (TF) foi calculado por meio da Equação 3, de acordo com os valores dos impostos (ICMS, PIS e CONFINS), tarifa base (T<sub>b</sub>) e o acréscimo ocasionado pela bandeira tarifária (B<sub>t</sub>).

$$T_F = \frac{T_b + B_t}{1 - (ICMS + PIS + CONFINS)} \quad (3)$$

Por fim, a quantidade de recursos financeiros economizados foi calculada por meio do produto entre a energia economizada nos cenários mencionados na subseção anterior e a tarifa final calculada de acordo com a metodologia nesta subseção.

### 3 | RESULTADOS E CONCLUSÕES

Diante dos cenários propostos por este trabalho, com percentuais de aproveitamento de energia arbitrados em 25, 50, 75 e 100% e as devidas eficiências térmicas provenientes do banco de dados utilizado, foi possível mensurar o quantitativo de energia com potencial de ser aproveitada, bem como os potenciais valores financeiros de economia.

O potencial energético de aproveitamento de calor pode ser observado na Tabela 4. Por meio desta tabela é possível observar que o potencial anual de economia de energia variou entre 736 e 3244 kWh/ano conforme os cenários propostos. Já o potencial de economia de recursos financeiros pode ser observado na Tabela 5. O valor da tarifa utilizado para este cálculo foi R\$ 912,23/MWh, valor calculado pelas premissas detalhadas neste trabalho.

Aproveitamento de energia Eficiência Energética (W/W)				
	25%	50%	75%	100%
4,01	736	1.471	2.207	2.942
3,21	772	1.544	2.316	3.089
2,65	811	1.622	2.433	3.244

Tabela 4. Potencial de aproveitamento energético (KWh/ano).

<div> <div>Aproveitamento de energia</div> <div> <div> <div></div> <div> <div> <div></div> <div> <div></div> <div></div> </div> </div> </div> </div> </div> <div> <div></div> <div> <div></div> <div> <div></div> <div></div> </div> </div> </div> </div>	25%	50%	75%	100%
<div> <div></div> <div> <div></div> <div> <div></div> <div></div> </div> </div> </div> <div> <div></div> <div> <div></div> <div> <div></div> <div></div> </div> </div> </div>	671	1.342	2.013	2.684
<div> <div></div> <div> <div></div> <div> <div></div> <div></div> </div> </div> </div> <div> <div></div> <div> <div></div> <div> <div></div> <div></div> </div> </div> </div>	704	1.409	2.113	2.818
<div> <div></div> <div> <div></div> <div> <div></div> <div></div> </div> </div> </div> <div> <div></div> <div> <div></div> <div> <div></div> <div></div> </div> </div> </div>	740	1.479	2.219	2.959

Tabela 5. Potencial economia financeira (R\$).

Pode-se observar tanto na Tabela 4, quanto na Tabela 5 que a variação do potencial de aproveitamento energético sofre expressiva influência do percentual de energia que será aproveitado. Em contrapartida, mesmo que a eficiência dos condicionadores de ar varie entre +24,9% e -17,4% do valor médio, isto não se reflete no aproveitamento de calor e economia de recursos financeiros com a mesma intensidade. Os últimos variam entre +5,0% e -4,7% do valor médio, sendo possível aproveitar mais calor dos aparelhos de ar condicionado menos eficientes, podendo isto ser visualizado de forma mais fácil no Figura 1 que expressa de maneira sucinta os resultados apresentados nas Tabelas 4 e 5.

Em relação a influência da eficiência energética do ar condicionado, pode-se observar que mesmo que em ares condicionados com uma maior eficiência energética ocorra uma redução da quantidade de calor rejeitado, a redução é mínima quando comparado com a quantidade total de calor rejeitado. Isto ocorre, pois a maior parte do calor rejeitado no condensador provem da energia que é retirada do ambiente, sendo assim mais influenciado pela capacidade do equipamento. Desta forma, mesmo que ocorra um desenvolvimento de novas tecnologias que aumentem a eficiência energética destes equipamentos, não se espera que ocorra uma grande variação na quantidade de calor liberado pelo condensador.

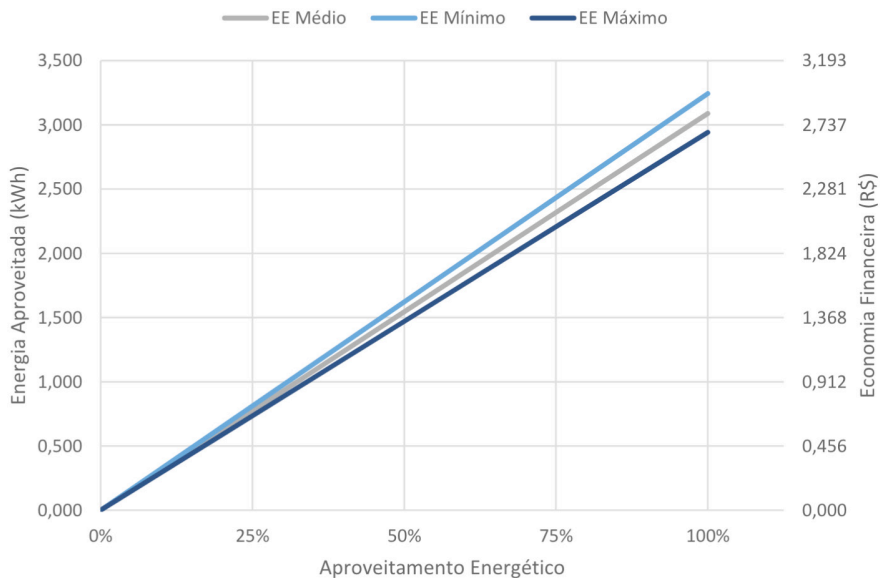


Figura 1. Representação gráfica, com a variação do percentual de aproveitamento energético, energia aproveitada e economia financeira.

Acerca do potencial de economia financeira, considerou-se o mesmo significativo, pois em um cenário com aproveitamento de 75% da quantidade de calor rejeitado pelo condensador seria possível economizar um valor próximo ao salário médio do brasileiro, R\$ 2.323 (IBGE, 2020). Contudo, embora demonstrado o potencial de econômico desta medida, isto não significa que qualquer forma de aproveitamento de calor será viável. Assim, além de desenvolver um sistema de aproveitamento, será necessário verificar a quantidade de energia que pode ser aproveitada pelo mesmo, considerando não só aspectos técnicos do sistema desenvolvido, mas também questões relacionadas aos hábitos do público alvo do equipamento a ser desenvolvido. Ressalta-se também que é necessário observar se haverá algum consumo energético extra associado a utilização do sistema desenvolvido, bem como a influência que este sistema poderá gerar na eficiência energética dos ares condicionados.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução homologatória N° 2.666**. Brasília, ANEEL, 2020.

ALVES, H. A. C. **Aproveitamento de Calor Rejeitado em Sistemas de Refrigeração**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 73 p., 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2020: Matriz Energética Nacional 2020 - Ano Base 2019**. Rio de Janeiro, EPE, 2020.

GOLDEMBERG, J. **Energia e desenvolvimento**. Estudos avançados, v. 12, n. 33, p. 7-15, 1998.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua trimestral – 1º trimestre de 2020**, 2020. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5431>>. Acesso em 20 out. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Tabelas de consumo/eficiência energética: condicionadores de ar**, 2020. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/condicionadores.asp>>. Acesso em: 22 set. 2020.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **The Future of Cooling: Opportunities for energy efficient**. Paris, IEA, 2018.

ISTOÉ DINHEIRO. **EPE prevê crescimento da demanda de energia de 3,6% ao ano até 2029**. Disponível em: <<https://www.istoedinheiro.com.br/epe-preve-crescimento-da-demanda-de-energia-de-36-ao-ano-ate-2029/>>. Acesso em: 20 set. 2020.

RIO DE JANEIRO. **Lei estadual 2.657, dispõe sobre o imposto sobre circulação de mercadorias e serviços e dá outras providências**. Assembleia Legislativa do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 1996.

\_\_\_\_\_. **Lei estadual 4.056, autoriza o poder executivo a instituir no exercício de 2003, o fundo estadual de combate à pobreza e às desigualdades sociais**. Assembleia Legislativa do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.

\_\_\_\_\_. **Lei estadual 7.786, dispõe sobre o imposto sobre a transmissão causa mortis e doação de quaisquer bens ou direitos (ITD), de competência do estado do rio de janeiro**. Assembleia Legislativa do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2017.

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **International Energy Outlook 2019, with projections to 2050**. Government Printing Office, Washington, EIA, 2019.

## EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO REGIME DE TRABALHO DE REFRIGERADOR DE GRÃOS INTEGRADO A TUBOS CANADIANOS

Data de aceite: 01/06/2021

Data de submissão: 07/03/2021

### **Eduarda Silva Costa**

Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas  
Brasília-DF  
<http://lattes.cnpq.br/6404534353655685>

### **Matheus Júnio Souza da Silva**

Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas  
Brasília-DF  
<http://lattes.cnpq.br/7720406742290055>

### **Ramiro de Matos Bertolina**

UDF Centro Universitário, Departamento de Engenharia Mecânica  
Brasília-DF  
<http://lattes.cnpq.br/6725020185311214>

### **Thiago Ferreira Gomes**

UDF Centro Universitário, Departamento de Engenharia Mecânica  
Brasília-DF  
<http://lattes.cnpq.br/7583553015090872>

**RESUMO:** Uma maneira de manter a qualidade dos grãos é resfria-los artificialmente por meio do insuflamento de ar refrigerado no sistema de aeração. Essa técnica é eficaz para a manutenção da qualidade do produto, uma vez que diminui a taxa metabólica dos grãos e retarda o desenvolvimento de insetos-praga, independentemente das características climáticas da região. Esse estudo consiste em

uma análise analítica do gasto energético de um equipamento refrigerador de grãos quando o sistema é integrado a tubos canadianos. No resfriamento, a temperatura do ar ambiente captado faz com que o equipamento consuma muita energia para alcançar as condições adequadas para conservação do grão. O consumo energético diminui quando o sistema é incorporado a tubos canadianos, uma vez que a temperatura do ar inserido no processo é reduzida por meio do trocador de calor ar-solo. A média de gasto por ciclo de refrigeração em silo de 400t é igual a R\$ 4.391/ciclo e com a integração dos dutos canadianos, esse gasto decai para R\$ 1.036/ciclo, uma redução de 76,4%. Assim, o equipamento de refrigeração seria menos requisitado e haveria uma maior eficiência energética no processo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Refrigerador de grãos, tubos canadianos, eficiência, aeração

### ENERGY EFFICIENCY IN THE GRAIN REFRIGERATOR WORK SYSTEM INTEGRATED TO CANADIAN PIPES

**ABSTRACT:** One way to maintain the quality of the beans is to cool them artificially by blowing cool air into the aeration system. This technique is effective for maintaining product quality, since it is at a metabolic rate of the grains and slows down the development of insect pests, regardless of the climatic characteristics of the region. This study consists of an analytical analysis of the energy expenditure of a grain cooler when the system is integrated with Canadian pipes. Without cooling, the ambient air temperature captured causes the equipment to consume a lot of energy to reach



the necessary conditions for grain conservation. The internal energy consumption when the system is incorporated into Canadian tubes, since the temperature of the air inserted in the process is reduced through the air-to-ground heat exchanger. The average expense per refrigeration cycle in a 400t silo is equal to R\$ 4,391 / cycle and with the integration of Canadian pipelines, this expense drops to R\$ 1,036 / cycle, a reduction of 76.4%. Thus, the refrigeration equipment would be less necessary and there would be greater energy efficiency in the process.

**KEYWORDS:** Grain cooler, canadian tubes, efficiency, aeration.

## 1 | INTRODUÇÃO

O agronegócio no Brasil é um dos pilares da economia, sendo este o único setor produtivo com alta no PIB no segundo trimestre de 2020, época em que o país atravessava a pandemia causada pelo covid-19. Conforme a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil – CNA (2020), mesmo o crescimento sendo menor do que o esperado, produtos como a soja (5,9%), o arroz (7,3%) e o café foram os principais destaques da produção.

A qualidade dos grãos está atrelada com a propulsão de todo agronegócio, e para garanti-la é necessário um eficiente sistema de armazenamento. Para que a qualidade dos grãos seja mantida, os silos devem oferecer um ambiente que seja desfavorável para o desenvolvimento de insetos-praga e para isso são empregados diferentes processos nesta etapa.

A aeração é um dos métodos mais eficientes para a conservação da qualidade dos grãos e sua principal função é o resfriamento. Nessa técnica, o ar passa pelos espaços entre os grãos propiciando assim uma troca constante de calor e umidade, evitando condições favoráveis para desenvolvimento de organismos indesejáveis e os riscos de perda por deterioração (ELIAS, 2018).

Em regiões com clima tropicais, como o Brasil, a aplicação das técnicas de resfriamento utilizando o ar natural se mostra ineficiente devido as altas temperaturas. Nesses casos, utilizar o ar resfriado artificialmente é uma alternativa viável, e a utilização de equipamentos refrigeradores é uma maneira de se garantir que as baixas temperaturas sejam alcançadas.

Com capacidade de refrigeração que podem ir até 125kW (MARCOLD GROUP, 2020), o custo de adquirir esses aparelhos e o gasto em energia são muito altos. Considerando que muitas vezes é necessário realizar mais de um ciclo de refrigeração nos silos, muitos produtores não tem condições de manter esses equipamentos em funcionamento, colocando em risco a qualidade de seus produtos.

A Segunda Lei da Termodinâmica estabelece que o calor flui de forma espontânea e irreversível de uma fonte de maior temperatura a uma de menor temperatura, até que o diferencial térmico se anule (ÇENGEL, 2007). Em máquinas térmicas, quanto menor for esse diferencial, menor será o trabalho realizado e o gasto de energia.

A proposta desse estudo é avaliar uma maneira de reduzir o gasto energético desses equipamentos. Para isso, o ar inserido dentro do processo de resfriamento terá sua temperatura reduzida por um sistema de dutos canadianos, que é um permutador de calor ar-solo e consiste em tubagens enterradas que permitem a troca térmica entre o ar e solo.

A análise será realizada de forma analítica, com dados obtidos através do dimensionamento de tubos canadianos feito por Costa *et. al* (2020), informações retiradas do manual de um modelo de resfriador de grãos da marca Marcold Group e de relações de máquinas refrigeradoras e termodinâmica presentes na literatura.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo Geral

Dentre os objetivos principais desse trabalho, tem-se a análise de gasto energético de um refrigerador de grãos utilizado na aeração de resfriamento em silos armazenadores, quando este está atrelado a um sistema de dutos canadianos.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Em relação aos **objetivos específicos**, busca-se:

- Levantar dados referentes ao modelo de refrigerador estudado.
- Obter os resultados analíticos alcançados a partir do dimensionamento do sistema de ventilação geotérmica realizado por Costa *et. al* (2020).
- Comparar o gasto energético do refrigerador quando está submetido a dois diferentes regimes de trabalho.
- Avaliar o custo monetário do gasto em energia elétrica do refrigerador que trabalha no regime mais eficiente.

## 2 | METODOLOGIA

Agora serão apresentadas a coleta de dados e a metodologia utilizada com a finalidade de analisar o desempenho do regime de trabalho do refrigerador, utilizando equações e conceitos descritos na literatura por Çengel e Boles (2011) e Van Wylen (2009).

### 2.1 Resfriador de grãos

O modelo do equipamento do resfriador de grãos escolhido foi o 37-80VE da linha Charly, comercializado pela empresa Marcold Group. Os refrigeradores dessa linha são capazes de refrigerar silos e armazéns pequenos e médios, com capacidade individual entre 300 e 10.000 toneladas, alcançando uma temperatura de 12° C. Abaixo, tem-se as informações técnicas do aparelho:

MODELO 37-80VE CHARLY	
Gás refrigerante	R 134 A
Modelo do compressor	BITZER CSH-8553- 80
Vazão com perda de carga do ventilador	39800 m³/h
Potência máxima absorvida pelo compressor	88 kW
Peso	3300 kg

Tabela 1 – Informações técnicas do refrigerador.

Fonte: Marcold Group (2020)

## 2.2 Sistema de ventilação geotérmica

A ventilação geotérmica consiste na ventilação através de tubagens enterradas no solo, que agem como um permutador de calor ar-solo, utilizando a inércia térmica da terra para climatização e arejamento (SOUSA, 2014). A finalidade do sistema é atrasar os picos de temperatura e insuflar um ar com a temperatura mais próxima à do solo, que se encontra mais frio que o ambiente. Alguns parâmetros que devem ser avaliados para um devido dimensionamento são: comprimento do poço, diâmetro do tubo, velocidade do ar, temperatura de saída e profundidade.

Costa et al. (2020) realizou um estudo e dimensionamento de um sistema de ventilação geotérmica a fim de resfriar o ar inserido no processo de aeração de resfriamento. Utilizando uma abordagem simplificada levando em consideração o comportamento térmico do solo e transferência de calor entre o solo e o ar que escoar nos dutos, os principais resultados foram:

- Tubos alocados em paralelo, para reduzir perda de carga
- Diâmetro da tubulação em paralelo: 0,71m
- Comprimento dos tubos em paralelo: 72 m
- Temperatura de saída de ar: 22 °C
- Velocidade de saída do ar: 11,4 m/s
- Vazão mássica do sistema (m): 13,15 kg/s

## 2.3 Análise de eficiência do regime de trabalho

As leis da termodinâmica definem os limites teóricos para o desempenho de máquinas térmicas, refrigeradores e outros sistemas de engenharia. Essas máquinas são projetadas para produzir trabalho e os engenheiros estão em constante busca de melhoria na eficiência desses dispositivos, pois quanto maior a eficiência, menores são os gastos com energia

As máquinas térmicas cíclicas operam entre um meio de alta temperatura ( $Q_q$ ) e um meio de baixa temperatura ( $Q_f$ ), e ao final de cada ciclo, o fluido de trabalho volta ao estado inicial. O trabalho e a eficiência dessas máquinas podem ser otimizados ao utilizar processos reversíveis, que na prática não podem ser realizados, mas demarcam as fronteiras do desempenho real.

Considerando a equação do balanço de energia definida pela Primeira Lei da Termodinâmica, o trabalho ( $W$ ) realizado por esses dispositivos térmicos definido pela Equação 1 (ÇENGEL E BOLES, 2011):

$$W = Q_q - Q_f \quad (1)$$

A fração de calor fornecido que é transformado em trabalho resulta na eficiência térmica do sistema. Na termodinâmica, a eficiência define o grau de sucesso com qual um processo de transferência ou conversão de energia é realizado e, para ciclos de refrigeração, é chamado de COP – Coeficiente de Desempenho e é definido pela Equação 2 (ÇENGEL E BOLES, 2011):

$$COP = \frac{1}{\frac{Q_q}{Q_f} - 1} \quad (2)$$

Em um ciclo de refrigeração, o processo não é espontâneo, ou seja, a troca térmica não ocorre de forma natural. Os refrigeradores necessitam de uma adição de trabalho para realizar a transferência de calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente. Mas o objetivo desse estudo não é avaliar o trabalho realizado no ciclo de refrigeração, e sim do sistema em geral. Considerando o refrigerador como um trocador de calor que opere no regime permanente, o balanço de energia se dá de acordo com a Equação 3 (ÇENGEL E BOLES, 2011):

$$W - Q_c + \dot{m}h_e = \dot{m}h_s \quad (3)$$

sendo  $-Q_c$  o calor retirado na entrada ( $Q_q$ ),  $\dot{m}$  a vazão mássica e  $h_e$  e  $h_s$  as entalpias do fluido na entrada e saída, respectivamente.

Se o volume de controle a ser considerado é todo o trocador, o trabalho é igual a 0 pois não há interações de trabalho e as variações de energia cinética e potencial são desprezíveis. Em gases reais, a variação de entalpia pode ser substituída por  $c_p \Delta T$ , sendo  $c_p$  o calor específico do fluido e  $\Delta T$  a variação de temperatura do fluido. Assim, tem-se a relação proposta na Equação 4 (ÇENGEL E BOLES, 2011):

$$Q_c = -\dot{m}c_p(T_s - T_e) \quad (4)$$

Em máquinas térmicas reversíveis que operam segundo o Ciclo de Carnot, a relação entre as fontes e a temperatura é estabelecida pela Equação 5 (VAN WYLEN, SONNTANG e BORGNAKKE, 2000), considerando as leis da termodinâmica e que todas as transferências de calor sejam positivas:

$$\frac{Q_q}{T_e} = \frac{Q_s}{T_s} \quad (5)$$

sendo  $Q_s$  o calor liberado na saída ( $Q_t$ ) e  $T_e$  e  $T_s$  as temperaturas de entrada e saída do fluido, respectivamente.

O gasto monetário em energia do equipamento é medido pelo trabalho multiplicado pela tarifa vigente para cada kWh, que é dada pela Equação 6:

$$\text{Consumo(R\$)} = W \cdot \text{tarifa} \quad (6)$$

Segundo o Decreto 9.642/2018, o setor de agronegócio possui 8% de desconto na tarifa vigente. Dados divulgados pela ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica (2020), definem o valor do kWh em Brasília/DF igual a 0,518 R\$/kWh, com vigência a partir de outubro de 2019.

Costa *et. al* (2020) traz um estudo de viabilidade da aplicação de um sistema de ventilação geotérmico para reduzir a temperatura do ar que é inserido no processo de resfriamento. Por meio de tubagens enterradas no solo, esse sistema faria com que o regime de trabalho do refrigerador fosse menos requisitado, já que o diferencial de temperatura de entrada e saída seria menor. Na Figura 1, é possível visualizar um desenho esquemático do funcionamento do refrigerador sem a adição dos tubos:

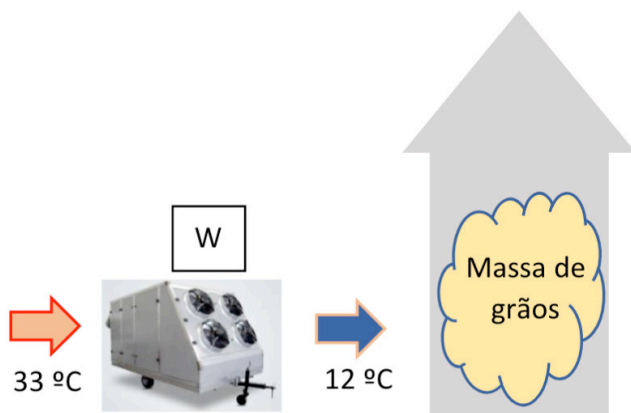


Figura 1 – Resfriamento do silo no modo convencional.

Fonte: Autoria Própria (2020)

Na Figura 2, nota-se que o refrigerador é menos requisitado se for integrado ao sistema de dutos canadianos:

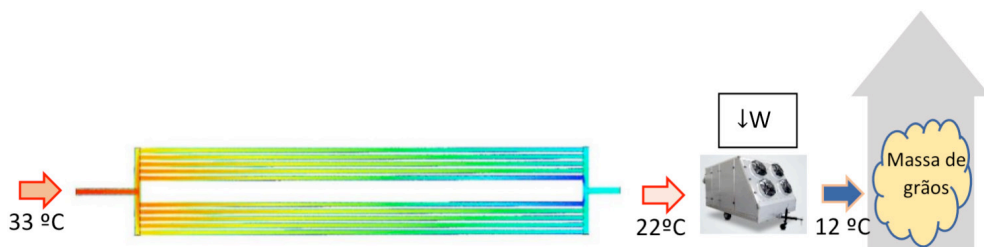


Figura 2 – Resfriamento integrado aos dutos canadianos.

Fonte: Autoria Própria (2020)

### 3 I RESULTADOS E CONCLUSÕES

A seguir, serão apresentados os resultados que foram obtidos através da análise analítica e comparação da eficiência do sistema quando está submetido a dois diferentes regimes de trabalho.

#### 3.1 Eficiência térmica quando a temperatura de entrada é igual a 33° C

Quando captado em temperatura ambiente, o ar possui uma temperatura mais elevada. Nesse caso, considera-se uma temperatura de 30 °C acrescidos de mais 3°C devido ao ventilador instalado no sistema de aeração. A finalidade do resfriador é reduzir essa temperatura até 12°C.

Considerando que o refrigerador atue segundo um ciclo de refrigeração de Carnot, quando  $T_e=33\text{ °C}$  e  $T_s=12\text{ °C}$ , tem-se  $Q_q=278,1\text{ kW}$  e  $Q_f=259\text{ kW}$ . Assim, o coeficiente de desempenho (COP), seguindo a Equação 2, é:

$$COP = \frac{1}{\frac{Q_q}{Q_f} - 1} = 13,57$$

O trabalho (W) é igual a 19,1 kW.

#### 3.2 Eficiência térmica quando a temperatura de entrada é igual a 22° C

Ao integrar o sistema do refrigerador com os dutos canadianos, a temperatura de entrada no ar no sistema é reduzida para valores próximos a 22°C. Assim, o valor de  $Q_q$  se reduz para 132,4kW,  $Q_f=128\text{ kW}$ , quando considerado o ciclo de refrigeração de Carnot, e a eficiência (COP) é:

$$COP = \frac{1}{\frac{Q_q}{Q_f} - 1} = 28,5$$

O trabalho (W) é igual a 4,5 kW.

### 3.3 Comparação de gasto monetário dos regimes

Os refrigeradores de grãos permanecem ligados constantemente até que se alcancem as condições necessárias para a conservação dos grãos, e esse período, em horas, é chamado de ciclo de refrigeração. Pelos resultados obtidos acima, percebe-se que o sistema com a menor variação de temperatura requer menos trabalho inserido. Considerando os valores de tarifa e o trabalho consumido, para cada regime tem-se, por hora, os gastos:

- Refrigerador não-otimizado: gasto de R\$ 9,11/h
- Refrigerador integrado aos dutos canadianos: gasto de R\$ 2,15/h

### 3.4 Conclusões

Aplicando esses valores num sistema real, segundo Silva (2000), um silo de 700t de grãos de soja precisa de em média 482 horas com o sistema de refrigeração ligado para que se atinja as condições adequadas de conservação da qualidade dos grãos. Nesse sistema, a média de gasto por ciclo de refrigeração seria igual a R\$ 4.391/ciclo. Com a integração dos dutos canadianos, esse gasto decai para R\$ 1.036/ciclo, uma redução de 76,4%, como pode ser visto no gráfico expresso na Figura 3:



Figura 3 – Comparação de gasto monetário entre os sistemas.

Fonte: Autoria Própria (2020)

Conclui-se então, que resfriar o ar inserido no processo de resfriamento de grãos por meio de dutos canadianos, é uma alternativa eficaz para reduzir o consumo de energia. Lembrando que a análise foi feita considerando que os processos são reversíveis e sem avaliar o ciclo de refrigeração do equipamento, então, essa diferença de gastos monetários podem ter valores maiores se considerar um sistema real.

## REFERÊNCIAS

ÇENGEL, Y.A. **Transferência de Calor e Massa: uma abordagem prática**. 3ª ed. AMGH, 2007

ÇENGEL, Y.A.; BOLES, M.A. **Termodinâmica**. 5ª ed. Michael Graw Hill, 2011

ANEEL. **Ranking das Tarifas**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/ranking-das-tarifas>. Acesso em: 29 de setembro de 2020.

BRASIL. Decreto nº 9.642, de 27 de dezembro de 2018. **Dispõe sobre a redução gradativa dos descontos concedidos em tarifa de uso do sistema de distribuição e tarifa de energia elétrica**. Diário Oficial da União, 2018.

CNA. **CNA mostra que PIB do agro é destaque no 2º trimestre de 2020**. Disponível em: <https://www.cnabrazil.org.br/noticias/cna-mostra-que-pib-do-agro-e-destaque-no-2-trimestre-de-2020>. Acesso em: 02 de setembro de 2020

COSTA, E.S; SILVA, M.J.S; BERTOLINA, R.M; GOMES, T.F. **Dimensionamento e análise CFD de tubos canadianos para aeração de refrigeração**. Anais do XX Congresso Internacional de Engenharia Mecânica e Industrial. Brasília, 2020.

ELIAS, M.C.; OLIVEIRA, M; VANIER, N.L. **Manejo da Aeração dos Grãos na Unidade Armazenamento para Preservar a Qualidade dos Grãos**. Universidade Federal de Pelotas, 2018.

MARCOLD GROUP. **Refrigeração para grãos e sementes**. Disponível em: <http://marcoldbrasil.com.br/sistemas-de-refrigeracao-e-secagem-para-graos-e-sementes>. Acesso em: 13 de agosto de 2020

SILVA, J. S. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Viçosa, Aprenda fácil, 2000

SOUSA, M.M.L.A. **Análise do desempenho energético de sistemas de ventilação geotérmica**. Universidade de Coimbra, 2014

VAN WYLEN, J.G.; SONNTANG, R.E.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. 4ªed., Editora Blucher, 2009.



## DIMENSIONAMENTO DE CARGA TÉRMICA DE CONDICIONARES DE AR NO BRASIL: UM ESTUDO DE CASO COMPARATIVO ENTRE A NR 17 E NBR 16401

Data de aceite: 01/06/2021

Data de submissão: 08/03/2021

### **David Coverdale Rangel Velasco**

Universidade Estadual do Norte Fluminense  
Darcy Ribeiro  
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro  
<http://lattes.cnpq.br/9356476964884212>

### **José Alexandre Tostes Linhares Júnior**

Universidade Estadual do Norte Fluminense  
Darcy Ribeiro  
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro  
<http://lattes.cnpq.br/9046803786078806>

### **Márcio Paulo Bonifácio das Neves**

Universidade Candido Mendes  
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro  
<http://lattes.cnpq.br/2951106557135895>

### **André Luiz Vicente de Carvalho**

Universidade Candido Mendes  
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro  
<http://lattes.cnpq.br/0509266582086801>

### **Afonso Rangel Garcez de Azevedo**

Universidade Estadual do Norte Fluminense  
Darcy Ribeiro  
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro  
<http://lattes.cnpq.br/5332016516191423>

**RESUMO:** Manter a temperatura corporal dentro dos limites salubres é uma das necessidades fundamentais para a sobrevivência do homem. Contudo, o conforto térmico não está relacionado somente a isto, mas também ao desempenho do

ser humano. Este trabalho consiste numa análise comparativa entre as duas normas brasileiras que tratam das condições de conforto térmico, NR 17 e NBR 16401. Por meio do DesignBuilder foi possível determinar a carga térmica mínima e máxima necessária para atender as normas supracitadas. O estudo de caso foi realizado na Universidade Candido Mendes, localizada no município de Campos dos Goytacazes. Foi possível observar que ambas as normas não são equivalentes e que a diferença entre elas pode ultrapassar os 30% para dimensionamento em sistemas unitário de condicionamento de ar. Contudo, pode-se observar neste estudo de caso que dimensionamentos de sistemas de condicionamento central existe um potencial menor para que a carga térmica em ambas as normas possua uma diferença tão expressiva. Dentre as normas avaliadas a NBR 16401 se mostrou como a mais conservadora do ponto de vista da carga térmica.

**PALAVRAS-CHAVE:** Carga térmica, conforto térmico, climatização, ergonomia.

### DIMENSIONING THE THERMAL LOAD OF AIR CONDITIONERS IN BRAZIL: A COMPARISON BETWEEN NR 17 AND NBR 16401

**ABSTRACT:** Keeping body temperature within healthy limits is one of the fundamental needs for man's survival. However, thermal comfort is not only related to this, but also to human performance. This work consists of a comparative analysis between the two Brazilian standards that deal with thermal comfort conditions, NR 17 and NBR 16401. Through DesignBuilder it was

possible to determine the minimum and maximum thermal load required to meet the above standards. The case study was carried out at the Candido Mendes University, located in the municipality of Campos dos Goytacazes. It was possible to observe that both standards are not equivalent and that the difference between them can exceed 30% for dimensioning in unit air conditioning systems. However, it can be seen in this case study that the design of central conditioning systems has less potential for the thermal load in both standards to have such a significant difference. Among the evaluated standards, NBR 16401 proved to be the most conservative from the point of view of thermal load.

**KEYWORDS:** Thermal load, thermal comfort, air conditioning, ergonomics.

## 1 | INTRODUÇÃO

De acordo com as necessidades de desempenho do corpo humano, seu metabolismo produzirá energia, devendo cerca de 80% desta ser rejeitada em forma de calor. É de responsabilidade da construção fornecer um conforto térmico ao homem, sejam elas quais forem às condições climáticas externas, afim de que o mesmo tenha melhores condições de vida e de saúde (FROTA; SCHIFFER, 2001).

O conforto térmico é variável fundamental para sua sobrevivência do homem, assim como sua produtividade, visto a influência que o conforto térmico possui nas capacidades físicas e psicológicas do mesmo. Watt (1996) constatou que a queda de produtividade aumenta exponencialmente em função do aumento de temperatura a níveis desconfortáveis, assim como cresce a frequência de erros. Segundo BATIZ, *et al.* (2009) pode-se perceber também que um desconforto térmico prejudica o processo de atenção e memória das pessoas.

Visando estabelecer condições psicofisiológicas mínimas de trabalho que proporcionem um conforto, segurança e desempenho eficiência aos trabalhadores, o Ministério do Trabalho e Emprego (MTE) criou a Norma Regulamentadora (NR) 17. A cerca das condições de climatização, a NR 17 recomenda que em locais de trabalho com solicitação intelectual e atenções constantes (escritórios, laboratórios, salas de desenvolvimentos e/ou análise de projeto, etc) sigam as seguintes recomendações: Índice de Temperatura Efetiva (ITE) entre 20 e 23°C, velocidade do ar máxima de 0,75 m/s, Umidade Relativa (UR) do ar mínima de 40% (MET, 2018).

Contudo, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) tem sua própria norma de refrigeração, a Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) 16401/2008. Esta norma substituiu a NBR 6401/1980 e trata de Instalações de ar-condicionado, Sistemas centrais e unitários, sendo fracionada em três partes. A primeira, denominada NBR 16401-1, atua traçando parâmetros para projetos que envolvam instalações, a segunda parte, NBR 16401-2, tem por finalidade fornecer parâmetros de conforto térmico e a última parte, NBR 16401-3, trata a respeito da qualidade do ar (ABNT, 2008b).

Os parâmetros de conforto térmico da NBR 16401-2 são apresentados na Tabela 1, sendo eles divididos de acordo com a estação do ano e a UR do ar. Ao comparar a

NBR 16401 com a NR 17 podemos observar-se que ambos utilizam diferentes critérios para dimensionamento. A priori, a NR 17 parece ser mais rigorosa por ser específica para ambientes com solicitações intelectuais e atenções constantes, mas em contra partida a NBR 16401-2 é específica para ar condicionados leva em consideração uma quantidade maior de variáveis.

	Verão (0,5 clo)		Inverno (0,9 clo)	
Umidade relativa do ar	65%	35%	60%	30%
Temperatura operativa	22,5°C a 25,5°C	23°C a 26°C	21°C a 23,5°C	21,5°C a 24°C
Grau de turbulência	30% a 50%	< 10%	30% a 50%	< 10%
Velocidade média do ar	0,20 m/s	0,25 m/s	0,15 m/s	0,20 m/s

Tabela 1. Parâmetros de conforto conforme a NBR 16401-2.

Uma vez que ITE não pode ser igualado a Temperatura Operativa do Ar (TOA) é possível que responsável pelo dimensionamento da carga térmica fique em dúvida sobre qual norma adotar. Neste sentido, o presente estudo, tem por finalidade, analisar comparativamente a aplicação das normas supracitadas, tendo como objeto de estudo o bloco B da Universidade Cândido Mendes (UCAM). A comparação foi realizada por meio do software DesignBuilder, o que permitiu verificar a diferença entre os métodos em diferentes salas que estavam em diferentes condições.

## 2 | MATERIAIS E MÉTODOS

NBR 16401-1 recomenda que a carga térmica necessária pra refrigerar ambientes seja dimensionado por meio de programas de computador, pois, exceto para ambientes muito simples, é inviável a sua realização sem a utilização de um software, dada a exatidão necessária e a complexibilidade cálculo (ABNT, 2008a).

Neste sentido, este estudo foi realizado por meio do DesignBuilder. Para a utilização deste *software* foi necessário construir um modelo tridimensional detalhado do ambiente a ser simulado, selecionar algoritmos para cálculos de carga térmica, bem como determinar o parâmetro de conforto térmico a ser alcançado. Assim, visando proporcionar a repetibilidade deste estudo, nas subseções seguintes serão detalhadas estas variáveis.

### 2.1 Ambiente simulado

O ambiente dimensionado foi o bloco B da UCAM, localizada na Avenida Anita Peçanha, número 100, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, com coordenadas geográficas aproximadamente iguais a 21°45'33"S, 41°20'44"O e com elevação de 13 metros (GOOGLE, 2020). A Figura 1 e 2 ilustram a vista frontal e superior da parte principal da UCAM respectivamente, sendo na última identificados os blocos da mesma.



Figura 1. Vista frontal da UCAM.

Fonte. BARCELO (2017).

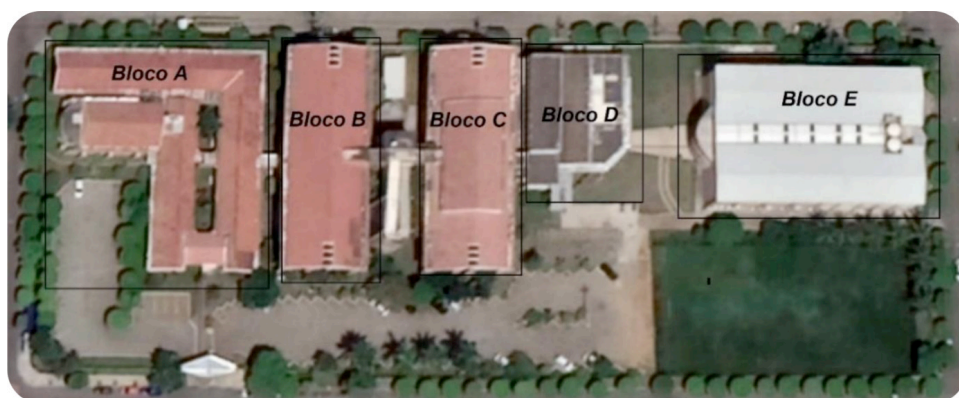


Figura 2. Vista superior da UCAM e suas divisões.

Fonte. Google (2020).

O bloco B é um edifício de 4 andares onde o último é reservado para arquivar documentos, os seus 3 primeiros possuem 33 salas de aula que são responsáveis por abrigar aproximadamente 1500 pessoas, assim como uma sala do apoio acadêmico, outra do Projeto Matemática Interativa (PMI) e outra do diretório acadêmico. Sendo o bloco B o objeto de estudo deste trabalho, restringiu-se o estudo somente as salas presentes nos 3 primeiros andares, onde há permanência de pessoas.

As condições climáticas na qual o ambiente estará submetido foram determinadas de acordo os dados do DesignBuilder do Rio de Janeiro com modificações realizadas e acordo a coordenadas do edifício e dados climáticos fornecidos da estação de Campos dos Goytacazes fornecidos pelo INMET. Estes dados estão disponíveis no site do Laboratório de Eficiência Energética em Edifícios (LabEEE) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) no formato *Energyplus Weather Data* (EPW).

A modelagem da construção foi realizada de acordo com medidas realizadas com trenas de 5 e 30m. Os materiais foram definidos de acordo com as informações fornecidas pelo encarregado de obras da UCAM, sendo eles os seguintes:

- Porta de 3 cm constituída integralmente de madeira;
- Parede de 15 cm constituída de: 2,5 cm de reboco + 10 cm de tijolo + 2,5 cm de reboco;
- Laje de 45 cm constituída de: 2 cm de gesso + 28 cm de espaço de ar + 12 cm de concreto + 1 cm argamassa + 2 cm de granito;
- Janela padrão do software, com propriedades do vidro em conformidade com a ISO 10292 e a *Europäische Norm* (EN) 673.

A quantidade de pessoas em sala de aula foi considerada igual a 1 aluno/m<sup>2</sup> e um professor por sala, visto que esse é a capacidade máxima segundo o MEC (2014). No entanto, como as demais salas possuem uma ocupação significativamente menos densa, considerou-se a ocupação das mesmas como 0,3 pessoa/m<sup>2</sup>. Embora no corredor não haja um número de pessoas fixas, considerou-se uma carga térmica flutuante conforme o valor padrão do *DesignBuilder*. Em todas as salas de aula considerou-se que o professor levaria um *datashow* e notebook, pois mesmo que a estrutura de uma determinada sala não possua um *datashow* fixo, a UCAM disponibiliza os equipamentos para empréstimo e tradicionalmente é utilizado junto com um *datashow* um notebook.

O dimensionamento, considerou que as salas do mesmo andar estão refrigeradas ao mesmo tempo enquanto que as de andares diferentes não estão, se assemelhando ao uso onde normal da UCAM. Foi desprezada a influência dos prédios vizinhos e, portanto, eles não foram inseridos no *DesignBuilder*. De modo a simplificar o cálculo, a carga térmica do professor e dos aparelhos eletrônicos foram somadas posteriormente no Excel. Contudo devido à falta de bibliografia e a baixa emissão de calor, a carga térmica das lousas digitais utilizadas nas salas do primeiro andar foram desprezadas. A bibliografia utilizada para definir a carga térmica dos equipamentos e professor foi a ASHARE (2017), fonte da NBR 16401-1, e os valores adotados são ilustrados na Tabela 2.

Fonte de calor	Potência dissipada
<b><i>Datashow</i></b>	308 W
<b>Professor</b>	160 W
<b>Computador</b>	59 W
<b>Lâmpada LED</b>	4,27 W

Tabela 2. Potência dissipada por fontes de carga térmica extra.

## 2.2 Algoritmos utilizados

Embora o DesignBuilder possa utilizar mais de 30 métodos do *EnergyPlus*, neste trabalho, conforme recomendação do DesignBuilder e devido aos métodos limitados a versão de teste, foram utilizados os algoritmos *Thermal Analysis Research Program* (TARP) e DOE-2, respectivamente para calcular a convecção interna e externa.

### 2.2.1 Thermal Analysis Research Program (TARP)

O TARP é um algoritmo que utilizado para calcular transferências de calor por convecção por meio da: Equação 1 da ASHARE (1985) para paredes verticais; Equação 2 de Walton (1983) para superfícies horizontais ou inclinadas estáveis, isto é, que tendem a retardar o movimento do fluxo de ar; e a Equação 3 de Walton (1983) para superfícies horizontais ou inclinadas instáveis com movimento intensificado (BATISTA; LAMBERTS; GÜTHS, 2011).

$$h = 1,31 \cdot |\Delta T|^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

$$h = \frac{1,810 \cdot |\Delta T|^{\frac{1}{3}}}{1,382 + |\cos \Sigma|} \quad (2)$$

$$h = \frac{9,482 \cdot |\Delta T|}{7,283 - |\cos \Sigma|} \quad (3)$$

Onde:

$h$ : Coeficiente de convecção, em  $W/m^2K$ ;

$\Delta T$ : Diferença da temperatura da superfície e do ar, em K ou  $^{\circ}C$ ;

$\cos \Sigma$ : Cosseno do ângulo de inclinação da superfície.

### 2.2.2 DOE-2 (Exterior)

O DOE-2 é algoritmo derivado da combinação dos algoritmos *Mobile Window Thermal Test* (MoWiTT) e o *Building Loads Analysis and System Thermodynamics* (BLAST). Neste algoritmo, para superfícies muito lisas, vidro, utiliza-se a Equação 4 e para superfícies mais rugosas faz-se necessário a utilização também da Equação 5 (MIRSADEGHI *et al.*, 2013).

$$h_{ext} = \sqrt{h_{nat}^2 + (a \cdot V_z^b)^2} \quad (4)$$

$$h_{ext} = (1 - R_f) \cdot h_{nat} + R_f \cdot \sqrt{h_{nat}^2 + (a \cdot V_z^b)^2} \quad (5)$$

Onde:

$h_{ext}$ : Coeficiente de convecção externo, em  $W/m^2K$ ;

$h_{nat}$ : Coeficiente de convecção natural, em  $W/m^2K$ ;

- a: Constante, em  $W/m^2K(m/s)^b$ ;  
 b: Constante;  
 $V_z$ : Velocidade do ar;  
 $R_f$ : fator de rugosidade superficial.

## 2.3 Parâmetros de conforto térmico utilizados

Os parâmetros de conforto térmico da NR 17 e NBR 16401-2/2008 estão associados a temperatura, UR e a velocidade do ar. De acordo com os dados da estação de Campos dos Goytacazes (A607) referentes ao ano de 2019 fornecidos pelo INMET (2020), foi verificar que o valor mediano da UR do ar é igual a 80% e o valor médio é igual a 75%. Assim, neste estudo considerou-se como UR do ar para ambas as normas o valor de 80% que é a mais crítica das medidas de centralidades supracitadas do ponto de vista de dimensionamento da carga térmica.

A velocidade do ar depende do equipamento utilizado para condicionar o ambiente, sua configuração e posição de instalação, assim como o local da sala na qual será realizada a leitura. Uma vez que o propósito deste trabalho é comparar a normas e não pontos de desconforto em ambientes, considerou-se que o ar do mesmo estivesse com uma velocidade homogeneia próxima ao repouso.

Além das premissas adotadas para ambas as normas, para realizar um dimensionamento conforme a NBR 16401-2 escolher uma estação para dimensionar a carga térmica. Como a condição crítica de projeto de um sistema de refrigeração é o verão, adotou-se como TOA, para as simulações referentes a NBR 16401-2.

Contudo, diferente da TOA, ITE não pode ser utilizado como parâmetro para dimensionamento de carga térmica pelo DesignBuilder. Desta forma deve-se utilizar algum recurso como equações e ábacos para determinar a temperatura do ar. Missenar criou duas formas de expressar o ITE, sendo a primeira em função da temperatura do ar e UR, Equação 6, e a segunda em função das variáveis supracitadas e a velocidade do ar, Equação 7 (SUPING *et al.*, 1992).

$$ITE = T_a - 0,4(T_a - 10) \left(1 - \frac{U_r}{100}\right) \quad (6)$$

$$ITE = 37 - \frac{37 - T_a}{0,68 - 0,0014U_r + \frac{1}{1,76 + 1,4v^{0,75}}} - 0,29T_a \left(1 - \frac{U_r}{100}\right) \quad (7)$$

Onde:

ITE: Índice de Temperatura Efetiva, em °C;

$T_a$ : temperatura do ar, em °C;

$U_r$ : Umidade Relativa, em %;

v: velocidade do ar, em m/s.



Visando trabalho utilizar um método que não dependa da velocidade do ar, utilizou-se a Equação 6 para determinar a temperatura do ar tendo como referência a UR de 80% e ITE de 20 e 23°C.

### 3 | RESULTADOS E CONCLUSÕES

Neste trabalho foram avaliadas 36 zonas, distribuídas em 3 andares, por meio de 4 simulações. As simulações da NR 17 foram realizadas tendo como parâmetro uma temperatura do ar de 20,9 e 24,1°C, enquanto as simulações da NBR 16401-2/2008 tiveram como parâmetro uma TOA de 22,5 e 25,5°C.

As simulações referentes a condição de máxima exigência da NR 17 e NBR 16401 foram apresentadas na Tabela 3, enquanto as referentes a carga térmica mínima necessária para refrigerar um ambiente foi apresentada na Tabela 4. Nestas tabelas também foi apresentada área do piso/teto e o volume interno do ambiente dimensionado. De forma a simplificar a visualização, os valores de carga térmica para um determinado ambiente foram destacados de acordo com o seu valor quando comparado com o da outra norma avaliada. Assim, o maior valor da carga térmica de uma sala foi destacado em verde, enquanto ou outro foi destacado em laranja. A variação expressa nestas tabelas corresponde a quantos por cento a maior carga térmica é superior a menor.

Zona	NR 17 (BTU/h)	NBR 16401 (BTU/h)	Variação (%)	Área (m²)	Volume (m³)
Sala 101	31.303	34.681	10,79	50	136
Sala 102	39.658	43.719	10,24	67	180
Sala 103	50.685	52.766	4,11	67	180
Sala 104	37.816	40.409	6,86	67	180
Sala 105	37.031	39.010	5,34	67	180
Sala 106	37.781	40.375	6,86	67	180
Sala 107	52.976	56.251	6,18	67	180
Sala 108	41.705	45.663	9,49	67	180
Sala do PMI	3.829	4.785	24,95	10	26
Subtotal - 1º andar	332.750	357.692	7,50	526	1420
Sala 201	48.700	54.637	12,19	67	186
Sala 202	48.359	54.671	13,05	67	186
Sala 203	45.288	49.860	10,10	67	186
Sala 204A	24.021	25.932	7,95	33	91
Sala 204B	24.464	26.512	8,37	33	92
Sala 205A	23.816	25.898	8,74	33	91
Sala 205B	24.191	26.307	8,74	33	92



Sala 206A	24.157	26.170	8,33	33	91
Sala 206B	24.055	25.795	7,23	33	92
Sala 207	24.240	26.322	8,59	33	91
Sala 208	24.001	25.673	6,97	33	91
Sala 209	28.232	32.327	14,50	33	92
Sala 210	27.584	31.508	14,23	33	92
Apoio Acadêmico	7.897	9.637	22,04	12	35
Subtotal - 2º andar	398.939	441.215	10,60	540	1512
Sala 301	52.283	59.721	14,23	67	186
Sala 302	51.396	58.595	14,01	67	186
Sala 303	49.212	55.115	12,00	67	186
Sala 304	48.086	53.818	11,92	67	186
Sala 305A	26.000	28.764	10,63	33	91
Sala 305B	26.443	29.207	10,45	33	92
Sala 306A	25.522	28.320	10,96	33	91
Sala 306B	25.863	28.423	9,89	33	92
Sala 307	26.458	29.290	10,70	33	91
Sala 308	25.844	28.403	9,90	33	91
Sala 309	30.007	34.681	15,58	33	92
Sala 310	29.597	34.135	15,33	33	92
Sala do DACAM	9.456	11.469	21,29	12	35
Subtotal - 3º andar	426.133	479.909	12,62	541	1514
Total	1.157.822	1.278.816	10,45	1.607	4.447

Tabela 3. Comparativo entre a NR 17 e a NBR 16401-2/2008: carga térmica necessária para atender toda a faixa de temperatura referente ao conforto térmico.

Zona	NR 17 (BTU/h)	NBR 16401 (BTU/h)	Variação (%)	Área (m²)	Volume (m³)
Sala 101	28.062	29.870	6,44	50	136
Sala 102	35.563	37.713	6,04	67	180
Sala 103	46.692	47.102	0,88	67	180
Sala 104	33.789	34.745	2,83	67	180
Sala 105	33.073	33.414	1,03	67	180
Sala 106	33.755	34.642	2,63	67	180
Sala 107	48.745	50.041	2,66	67	180
Sala 108	37.406	39.487	5,56	67	180
Sala do PMI	2.942	2.908	1,17	10	26
Subtotal - 1º andar	300.061	309.888	3,27	526	1420
Sala 201	44.401	49.622	11,76	67	186
Sala 202	44.026	49.553	12,56	67	186

Sala 203	40.989	44.128	7,66	67	186
Sala 204A	21.905	23.304	6,39	33	91
Sala 204B	22.144	23.850	7,70	33	92
Sala 205A	21.428	22.861	6,69	33	91
Sala 205B	21.701	23.270	7,23	33	92
Sala 206A	21.871	23.577	7,80	33	91
Sala 206B	21.939	23.338	6,38	33	92
Sala 207	21.715	23.285	7,23	33	91
Sala 208	21.886	23.285	6,39	33	91
Sala 209	25.503	29.017	13,78	33	92
Sala 210	24.888	28.198	13,30	33	92
Apoio Acadêmico	6.122	7.760	26,75	12	35
Subtotal - 2º andar	360.552	395.049	9,57	540	1512
Sala 301	47.745	54.330	13,79	67	186
Sala 302	46.824	53.204	13,63	67	186
Sala 303	44.435	49.144	10,60	67	186
Sala 304	43.548	47.574	9,25	67	186
Sala 305A	23.338	25.010	7,16	33	91
Sala 305B	23.748	30.879	30,03	33	92
Sala 306A	22.895	24.840	8,50	33	91
Sala 306B	23.168	25.249	8,98	33	92
Sala 307	23.762	25.537	7,47	33	91
Sala 308	23.182	25.230	8,83	33	91
Sala 309	27.140	31.099	14,58	33	92
Sala 310	26.731	30.655	14,68	33	92
Sala do DACAM	7.613	9.319	22,41	12	35
Subtotal - 3º andar	384.130	432.173	12,51	541	1514
Total	1.044.744	1.137.110	8,84	1.607	4.447

Tabela 4. Comparativo entre a NR 17 e a NBR 16401-2/2008: carga térmica necessária para atender a temperatura mínima referente ao conforto térmico.

Pode-se observar embora a NR 17 seja específica para solicitação intelectual e atenções constantes, em 71 dos 72 cenários analisado a NBR 16401-2 se mostrou mais rígida. Ressalta-se ainda que como a UR do ar é reduzida com o funcionamento do ar condicionado, sendo assim ao considerar a UR do ar como 80% foi uma medida conservadora que tende a tornar a carga térmica calculada pela NR 17 ligeiramente superior. No único cenário em que a NR 17 foi mais rígida a mesma teve uma carga térmica calculada em pouco mais de 1% da NBR 16401, enquanto nos demais cenários a carga térmica calculada pela última norma chegou a ser 30% do que a calculada pela primeira,

sendo este um valor correspondente ao dobro do coeficiente de segurança padrão do DesignBuilder.

No cenário expresso na Tabela 3, pode-se observar as zonas dimensionadas por meio da NBR 16401 são em média 11,19% mais exigentes que a NR17, possuindo uma mediana em 10,35% e um desvio padrão de 4,48% decorrente de variação que oscilou entre 24,95 e 4,11%. Já no cenário expresso na Tabela 4, a NBR 16401 continua sendo mais exigente, contudo, com um valor médio e mediano de 9,40 e 7,68% respectivamente. O que indica que em média os valores da NR 17 e NBR 16401 estão mais próximos. Contudo, pode-se observar também que o desvio padrão do último cenário é de 6,51%, o que é resultado de uma maior disparidade em determinadas zonas em relação ao valor médio, sendo a carga térmica da NBR 16401 de -1,16% a 30,03% da carga térmica calculada pela NR 17.

Quando se observa a diferença por andar, pode-se observar que a menor diferença entre as cargas térmicas das normas foi encontrada no primeiro pavimento, enquanto a maior esteve no terceiro. Contudo, uma vez que estas cargas térmicas são o somatório das cargas térmicas individuais das salas, a disparidade entre as cargas térmicas calculadas das normas foi minimizada situando-se entre 7,5 e 12,62%, com valor médio e mediano de respectivamente 10,24 e 10,60%, para o cenário da Tabela 3, com um desvio padrão de 2,11%, e entre 3,27 e 9,57, com valor médio e mediano de respectivamente 8,45 e 9,57%, para o cenário da Tabela 4, com um desvio padrão de 3,85%.

Por fim, pode-se observar que em geral, para dimensionamento de carga térmica de ar condicionados, a NBR 16401 é mais rígida, mas os dados não convergiram para um valor no qual indicasse o quanto mais rígida a mesma é que a NR 17. Para determinar isto é necessário realizar um estudo específico para o ambiente que for avaliado, pois é possível que os valores da NR 17 e NBR 16401 sejam próximos ou até mesmo que o da NR 17 seja mais conservador. Pode-se observar também que implantação de um sistema de condicionamento de ar unitário potencial maior de atender a uma norma e não a outra. Isso ocorre, pois num sistema de condicionamento central a carga térmica de vários ambientes é somada para seleção de um único aparelho e regiões cujas diferenças entre o resultado ao aplicar diferentes normas forem mais expressivas seriam amenizadas por regiões que os valores seriam mais próximos. Vide o exemplo deste trabalho em que caso fosse instalado um aparelho de refrigeração por andar o mais *spread* seria de 12,51%, enquanto que para sistemas unitários o maior seria de 30,03%.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR16401-1 - **Instalações de ar condicionado: sistemas centrais e unitários: projeto das instalações**. Rio de Janeiro, ABNT, 2008a.

\_\_\_\_\_. NBR16401-2 - **Instalações de ar condicionado: Sistemas centrais e unitários: parâmetros de conforto térmico**. Rio de Janeiro, ABNT, 2008b.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATION AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **Handbook: Fundamentals**. New York, ASHRAE, 2017.

\_\_\_\_\_. **ASHRAE Handbook: fundamentals**. Atlanta, ASHRAE, 1985.

BARCELO, J. G. M. **Arquivo Pessoal**, 2017.

BATISTA, J. O.; LAMBERTS, R.; GÜTHS, S. **Influências dos algoritmos de condução e convecção sobre os resultados de simulações do comportamento térmico de edificações**. Ambiente Construído, v. 11, n. 4, p. 79–97, 2011.

BATIZ, E. C.; GOEDERT, J.; MORSCH JUNIOR, J.; KASMIRSKI JUNIOR, P.; VENSKE, R. **Avaliação do conforto térmico no aprendizado: estudo de caso sobre influência na atenção e memória**. Production, v. 19, n. 3, p. 477-488, 2009.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. 6. ed. Studio Nobel, São Paulo, 243 p., 2001.

GOOGLE. **Google Earth Pro**. Version 7.3. Disponível em: <<https://www.google.com.br/earth/download/gep/agree.html>>. Acesso em: 20 set. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Tempo: Gráficos**. Brasil: INMET, 2020. <<https://tempo.inmet.gov.br/Graficos/83801#>>. Acesso em: 26 ago. 2020.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Arquivos climáticos INMET 2012**. Universidade Federal de Santa Catarina: labEEE, 2020. <<http://labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-epw>>. Acesso em: 26 ago. 2020.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. **Portaria N° 701**. Brasil, MEC, 2014.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **NR17 - Ergonomia**. Brasil, MTE, 2018.

MIRSADEGHI, M.; CÓSTOLA, D.; BLOCKEN, B.; HENSEN J. L. M. **Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy simulation programs: Implementation and uncertainty**. Applied Thermal Engineering, v. 56, p. 134–151, 2013.

SUPING, Z.; Guanglin, M.; Yanwen, W.; Ji, L. **Study of the relationships between weather conditions and the marathon race, and of meteorotropic effects on distance runners**. International Journal of Biometeorology, v. 36, n. 2, p. 63–68, 1992.

WATT, J. R. **Evaporative Air Conditioning Handbook**. 2. ed. Springer Verlag, New York, 456 p., 1986.

WALTON, G. N. **Thermal analysis research program reference manual**. US Department of Commerce, National Bureau of Standards, Washington, DC, EUA, 278 p., 1983.

## AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO NO INTERIOR DE UM VEÍCULO AUTOMOTOR PERTENCENTE À FROTA DE TRANSPORTE PÚBLICO COLETIVO NO MUNICÍPIO DE CUIABÁ-MT

Data de aceite: 01/06/2021

Data de submissão: 12/05/2021

### **Roberta Daniela de Souza**

Eng. Ambiental, Mestre, Doutoranda em Física Ambiental pelo Programa de Pós-graduação em Física Ambiental (PPGE) da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/6695057034861231>

### **Marcelo Dias de Souza**

Professor, Doutor, Universidade de Cuiabá (UNIC)  
Cuiabá – MT, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/9474670068485343>

### **Jonathan Willian Zangeski Novais**

Professor, Doutor, Universidade de Cuiabá (UNIC)  
Cuiabá – MT, Brasil  
<http://lattes.cnpq.br/5665663207008673>

**RESUMO:** A mobilidade urbana é um dos maiores desafios enfrentados pela população de grandes cidades. Um os meios de locomoção ofertados pelo poder público à sociedade é o transporte coletivo. Porém, usuário e colaboradores estão continuamente expostos a ambientes termicamente desconfortáveis. Isto posto, o estudo teve como objetivo avaliar o conforto térmico no ambiente interno de veículos não climatizados do transporte público coletivo no município de Cuiabá - Mato Grosso. Foram monitoradas as variações na temperatura do ar, umidade relativa do ar em três pontos

predefinidos no interior do veículo em três horários distintos, nos períodos seco e chuvoso. Aos dados foram aplicados o cálculo de índice de calor de Steadman - IC para análise do conforto térmico. Diante dos resultados, observou-se que no período seco o nível de alerta de IC variou de Cautela a Cautela Extrema, já no período chuvoso o IC variou de Cautela Extrema a Perigo, estando todos os seus ocupantes suscetíveis a consequências psicofisiológicas devido a exposição ao calor. Conclui-se que devido a influência das condições de tempo atmosféricos aliadas as características estruturais destes veículos o ambiente caracteriza-se como termicamente desconfortável.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ônibus, temperatura do ar, índice de calor, umidade relativa do ar.

### EVALUATION OF THERMAL COMFORT INSIDE AN MOTOR VEHICLE BELONGING TO THE PUBLIC TRANSPORT FLEET IN THE MUNICIPALITY OF CUIABÁ-MT

**ABSTRACT:** Urban mobility is one of the biggest challenges faced by the population of large cities. One of the means of locomotion offered by the public power to society is public transport. However, users and employees are continuously exposed to thermally uncomfortable environments. This said, the study aimed to evaluate the thermal comfort in the internal environment of non-air-conditioned vehicles of public transport in the municipality of Cuiabá - Mato Grosso. Variations in air temperature, relative humidity were monitored at three

predefined points inside the vehicle at three different times, during the dry and rainy periods. The data were applied the calculation of Steadman heat index - HI for thermal comfort analysis. In view of the results, it was observed that in the dry period the level of HI alert varied from Caution to Extreme Caution, while in the rainy season the HI varied from Extreme Caution to Danger, with all its occupants susceptible to psychophysiological consequences due to exposure to heat. It is concluded that due to the influence of atmospheric weather conditions combined with the structural characteristics of these vehicles, the environment is characterized as thermally uncomfortable.

**KEYWORDS:** Bus, air temperature, heat content, relative humidity.

## INTRODUÇÃO

A mobilidade urbana é um dos maiores desafios enfrentados pela população de grandes cidades. Dentre os meios de locomoção ofertados pelo poder público à sociedade é o transporte coletivo, no entanto, a falta de qualidade na prestação de serviços desestimula sua utilização, é o que aponta a auditoria realizada no município de Cuiabá - MT no ano de 2016 pelo Tribunal de Contas de Mato Grosso (TCE-MT, 2016), que do total reclamações registradas, 83% dos usuários avaliaram o grau de conforto dos ônibus como “ruim ou péssimo”.

O desconforto pode estar relacionado à combinação de fatores tanto estruturais como micrometeorológicos, haja visto que a capital de Mato Grosso é popularmente conhecida como uma das capitais mais quentes do Brasil, não sendo raro o alcance dos 40°C, o que contribui com a sensação de desconforto térmico tanto em ambientes externos quanto em ambientes internos com ventilação natural como é o caso da maioria dos ônibus que fazem parte da frota do transporte público municipal.

Diante do exposto, o objetivo deste estudo é avaliar o conforto térmico do ambiente interno do ônibus do transporte coletivo na capital do estado de Mato Grosso, Cuiabá, por meio da aplicação do índice de calor de Steadman - IC (STEADMAN, 1979) também conhecido como Heat Index.

## MATERIAL E MÉTODOS

De acordo com o último levantamento censitário Cuiabá possui uma população de aproximadamente 551.098 habitantes (IBGE, 2010), destes, aproximadamente 200 mil pessoas fazem uso diariamente da frota do transporte coletivo (MTU, 2017).

Para efetivação da pesquisa, foram monitorados os parâmetros de temperatura do ar e umidade relativa do ar em três pontos no interior dos ônibus estando o primeiro (P1) localizado no compartimento do motorista, e os demais distribuídos após a catraca (P2 e P3), posterior as portas de acesso (entrada-saída). Os dados foram registrados a cada 2 minutos durante o tempo de realização do itinerário completo (centro-bairro-centro) de aproximadamente 60 minutos, com o auxílio de um instrumento portátil denominado

Analizador Multiparâmetros- Modelo C-02, fabricado pela empresa Instrutherm, localizada na cidade de São Paulo – SP, Brasil.

A amostragem transcorreu em três dias úteis consecutivos no mês de agosto (seco) de 2018 e no mês de fevereiro (chuvoso) de 2019, em três turnos, matutino (início das coletas às 8h), vespertino (às 14h período de maior aquecimento) e noturno (às 18h, início do resfriamento). Para maior controle sobre o erro experimental durante o procedimento subdividiu o tratamento em blocos homogêneos, aleatorizando os pontos de coleta no interior do veículo em função dos horários de amostragem.

Ressalta-se que, devido aos veículos possuírem as mesmas características construtivas (marca/modelo) com motor posicionado na parte dianteira, a amostragem foi realizada ao acaso, ou seja, não absteve-se a um único veículo, pois a intenção do estudo é recolher informações dos parâmetros micrometeorológicos em seu interior.

Após a amostragem, os dados foram compilados em planilhas do Software Microsoft® Excel® do pacote Office 365 (para Windows 10) e a eles aplicado o índice de calor de Steadman - IC (STEADMAN, 1979), realizando a combinação entre os parâmetros de temperatura do ar e umidade relativa do ar, resultando em uma “temperatura aparente”, representativa do calor ou da sensação térmica sentida pelo organismo (NOBREGA E VERÇOSA, 2011). O Índice de Calor de STEADMAN é dado em graus Fahrenheit (°F), por meio da seguinte Equação (1):

$$C = -42,379 + 2,04901523 * T_{ar} + 10,14333127 * UR - 0,22475541 * T_{ar} * UR - 6,83783 * 10^{-3} * (T_{ar})^2 - 5,481717 * 10^{-2} * (UR)^2 + 1,22874 * 10^{-3} * (T_{ar})^2 * UR + 8,5282 * 10^{-4} * T_{ar} * (UR)^2 - 1,99 * 10^{-6} * (T_{ar})^2 * (UR)^2 \quad (1)$$

Em que o IC – é o índice de calor (°F); T – Tar é a temperatura do ar real (temperatura do bulbo seco) (°F) e UR – Umidade Relativa do ar (%).

De posse dos resultados do IC, procedeu-se pela comparação entre os valores obtidos aos de referência (NOAA, 2013) que alerta para possíveis danos fisiológicos decorrentes da exposição humana. Para melhor entendimento foram instituídas siglas para classificação das faixas de IC: (Ausência de Alerta – AA) para exposição de IC inferiores a 27°C não há riscos fisiológicos; (Cautela - C) quando a faixa de IC estiver entre 27 e 32°C pode ocorrer fadiga em casos de exposição prolongada e atividade física; (Extrema Cautela - CE) para faixa de IC entre 32 a 41°C há risco de câimbras, insolação e exaustão devido exposição prolongada e/ou atividade física; (Perigo - P) para faixa de IC entre 41 e 54°C pode haver insolação, câimbras, esgotamento e possibilidade de dano cerebral (AVC) devido exposições prolongadas e /ou atividades físicas; (Perigo Extremo- PE) para exposição à IC igual ou superior a 54°C pode ocorre insolação e risco de acidente vascular cerebral iminente (AVC).

# RESULTADOS E DISCUSSÃO

Mediante aos valores resultantes da aplicação do cálculo de IC (convertidos em graus Celsius), foi possível determinar a condição térmica do ambiente veicular durante a realização do itinerário nos horários e períodos preditos, em relação as variações de temperatura do ar e umidade relativa do ar registradas. A análise do índice de calor e a classificação do nível de alerta conforme National Weather Service Eather Forecast Office (NOAA) estão descritas na Tabela 1.

Índice de Calor de Steadman – IC (°C)										
Dia/ Período/ Pontos			Período do Ano							
			Seco				Chuvoso			
			Tar	UR%	IC	NA	Tar	UR%	IC	NA
1º Dia	M	P1	26,8	60,6	27,3	C	34,0	64,3	39,6	CE
	V	P2	33,7	40,4	34,4	CE	38,0	44,4	44,3	P
	N	P3	28,9	51,7	29,3	C	33,7	63,8	39,8	CE
2ºDia	M	P2	28,3	55,5	28,7	C	32,7	64,1	38,8	CE
	V	P3	37,3	35,3	38,5	CE	37,2	52,7	45,1	P
	N	P1	33,3	44,5	34,1	CE	31,2	83,4	36,6	CE
3ºDia	M	P3	29,4	61,1	30,9	C	35,2	62,3	41,0	CE
	V	P1	40,0	29,9	41,0	CE	40,7	41,4	49,0	P
	N	P2	33,4	47,3	33,2	CE	34,9	54,6	39,4	CE

Legenda: M = Matutino; V = Vespertino; N = Noturno; P = Pontos experimentais; (localização dos pontos: P1 = compartimento do motorista; P2 = centro do salão de passageiros; P3 = final do salão de passageiros).

Tabela 1 – Valores de IC nos pontos experimentais em função dos horários, nos períodos seco e chuvoso e classificação do nível de alerta (NA) de possíveis consequências fisiológicas ao corpo humano, representadas pelas siglas (AA) ausência de alerta, (C) cautela, (CE) cautela extrema, (P) perigo, (PE) perigo extremo.

No que concerne a classificação do nível de alerta do IC nos dias monitorados em ambos os períodos do ano (seco e chuvoso), foram observados valores superiores ao limite (27 °C) preconizado (NOAA, 2013) para que ambiente seja considerado confortável e com ausência de alerta para possíveis consequências fisiológicas (Tabela 1) . Valores superiores a este limite configuram risco à saúde, pois além dos efeitos psicofisiológicos e estresse térmico podem ocorrer quadros de desidratação, já que para o arrefecimento da temperatura corporal há um aumento da produção de suor, eliminando não apenas água como também sais minerais, provocando mudanças no desempenho físico e mental (SAWKA e MONTAIN, 2000). Além disso, não descarta-se a possibilidade de danos cerebrais (AVC).



Observa-se um padrão de elevação da classificação dos níveis de alerta do IC na transição entre o horário matutino e vespertino com discreta diminuição no horário noturno, porém, mantiveram-se entre as faixa de alerta de Cautela a Cautela Extrema no período seco, e, no período chuvoso a classificação variou entre Cautela Extrema e Perigo, indicando a insalubridade do ambiente principalmente para o posto de motorista (P1), que para o desempenho de suas atividade fica exposto ao estresse térmico. Ainda sob a ótica da atividade laboral do motorista, segundo Lamberts et al. (2011) além de sintomas associados a síndrome de calor as alterações psicossensoriais devem ser consideradas pois podem ocasionar queda de produtividade profissional tornando-se consequentemente um risco a segurança dos usuários do veículo.

## CONCLUSÃO

Os resultados das análises do conforto térmico no interior veicular possibilitam observar que:

1. No período seco (inverno) a maior sensação térmica no horário vespertino chegou à 41°C, corresponde faixa de “Cautela Extrema”, no P1 localizado no posto do motorista.
2. No período chuvoso (verão) a maior sensação térmica no horário vespertino chegou à 49°C, correspondente à faixa de “Perigo”, no P1.
3. Durante a realização do experimento nos horários e períodos avaliados, tanto usuários quanto o motorista estiveram expostos a situações termicamente inadequadas, principalmente no período chuvoso.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## REFERÊNCIAS

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE. **Censo Demográfico, 2010**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=510340>>. Acesso em 14 jun. 2018.

LAMBERTS, R.; XAVIER, A. A.; GOULART, S.; Vecchi, R. D. **Conforto e Stress Térmico. Apostila**. Centro Tecnológico - Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina - SC. 2011.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Summer Weather Safety and Survival. The Heat Index**. Disponível em: <<https://www.weather.gov/oun/safe-ty-summer>>. Acesso em: 05 nov. 2018.

NÓBREGA, R. S.; VERÇOSA, T. O microclima e o (des)conforto térmico em ambientes abertos na cidade do Recife. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 28, n. 1, p. 93-109, 2011. Disponível em: <<https://www3.ufpe.br/tropoclima/images/pdf/nobrega.pdf>> Acesso em: 25 out. 2018.

SAWKA, M. N.; MONTAIN, S. J. Fluid and electrolyte supplementation for exercise heat stress. The American journal of clinical nutrition, v. 72, n. 2, p. 564S-572S, 2000. Disponível em: <<https://academic.oup.com/ajcn/article/72/2/564S/4729614>>. Acesso em: 27 mai. 2019.

STEADMAN, R. G. The assessment of sultriness. Part I: A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science. **Journal of applied meteorology**, v. 18, n. 7, p. 861-873, 1979. Disponível em: <<https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0450%281979%29018%3C0861%3ATAOSPI%3E2.0.CO%3B2>>. Acesso em: 15 out. 2018. doi.org/10.1175/1520-0450(1979)018%3C0861:TAOSPI%3E2.0.CO;2.

TRIBUNAL DE CONTAS DE MATO GROSSO- TCE-MT. Secretaria de Controle Externo de Auditorias Operacionais. **AUDITORIA ESPECIAL DE NATUREZA OPERACIONAL NO TRANSPORTE COLETIVO URBANO DE CUIABÁ E VÁRZEA GRANDE**.2016. Disponível em:<file:///C:/Users/rober/Downloads/RELATORIOTECNICODEDEFESA1387032016\_01.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2018.

# CAPÍTULO 17

## AVALIAÇÃO ERGONÔMICA DE UM VEÍCULO BAJA

*Data de aceite: 01/06/2021*

### **Arthur Barroso Costa**

Universidade Federal de São João del-Rei  
(UFSJ); Campus Santo Antônio; DEMEP

### **João Lucas Moura Ferreira**

Universidade Federal de São João del-Rei  
(UFSJ); Campus Santo Antônio; DEMEP

### **Igor Antunes Ferreira**

Universidade Federal de São João del-Rei  
(UFSJ); Campus Santo Antônio; DEMEP

### **Luiz Gustavo Monteiro Guimarães**

Universidade Federal de São João del-Rei  
(UFSJ); Campus Santo Antônio; DCTEF

**RESUMO:** A ergonomia reflete no desempenho de nossas atividades e, desse modo, uma postura adequada para conduzir um veículo afetará a performance dele. O objetivo do presente estudo é analisar tal postura e o conforto em um veículo de competição Baja SAE. Partindo de um modelo CAD (Computer Aided Design) do chassi, avaliou-se a ergonomia de seis manequins diferentes, sendo três deles pilotos da equipe Komiketo Baja UFSJ e outros três com os respectivos percentis: 05% feminino, 50% masculino e 95% masculino, pelo método RULA (Rapid Upper Limb Assessment), a partir do questionário RULA, do software CATIA V5, de acordo com Tilley e um questionário subjetivo aplicado aos pilotos, obtivemos, como resultado, o desconforto percebido na pilotagem e, a partir

dele, os níveis de ação nas posturas com maior índice de frequência. A referida análise apontou a necessidade de investigar e alterar a posição do condutor e de alguns componentes do carro.

**PALAVRAS-CHAVE:** Baja Sae Brasil, Catia V5, Ergonomia, Rula, Tilley.

### ERGONOMIC EVALUATION OF A BAJA VEHICLE

**ABSTRACT:** Ergonomics reflects the performance of our activities and, consequently, an adequate posture to drive a vehicle will affect its performance. The aim of the present study is to analyze this posture and the driver's comfort in a Baja SAE Competition vehicle. Based on a CAD (Computer Aided Design) model of the chassis, the ergonomics of six different mannequins were evaluated, three of them pilots from the Komiketo Baja UFSJ team and three with the respective percentiles: 05% female, 50% male and 95 % male, by the RULA method (Rapid Upper Limb Assessment), through the RULA questionnaire, from the CATIA V5 software, according to Tilley and a subjective questionnaire applied to the pilots, we obtained, as a result, the discomfort perceived in the piloting and, from it , the action levels in the postures with the highest frequency index. This analysis pointed to the need to investigate and change the positioning of the driver and some components of the car.

**KEYWORDS:** Baja Sae Brasil, Catia V5, Ergonomics, Rula, Tilley.

## 1 | INTRODUÇÃO

Atualmente, os carros de competição não visam somente um bom desempenho dinâmico, em que a performance é priorizada, mas também o conforto. O desconforto muscular pode acarretar perda de rendimento e lesões no piloto. Um projeto visando a boa interação entre o piloto e o carro, através de uma postura confortável e comandos acessíveis, permite que o condutor consiga extrair o máximo de desempenho possível durante a pilotagem.

A Associação Brasileira de Ergonomia (ABERGO) divide os domínios da ergonomia em: ergonomia física, cognitiva e organizacional. Ergonomia física relaciona as características anatômicas, antropométricas, fisiológicas e biomecânicas do ser humano em sua relação com a atividade física. Os tópicos relevantes incluem o estudo da postura no trabalho, manuseio de materiais, movimentos repetitivos, distúrbios musculoesqueléticos relacionados ao trabalho, projeto de posto de trabalho, segurança e saúde ([http://www.abergo.org.br/internas.php?pg=o\\_que\\_e\\_ergonomia](http://www.abergo.org.br/internas.php?pg=o_que_e_ergonomia)).

O presente trabalho presa por analisar a ergonomia e interação de projetos dos sistemas de um veículo *off road*, focado nas competições Baja SAE (Society of Automotive Engineering) Brasil, estudando o protótipo KB08 da equipe Komiketo Baja UFSJ da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ). Em uma determinada etapa do processo, observou-se a conveniência de determinar aspectos de conforto para o piloto e que iria interferir nos setores de Direção e Freios, além de outros componentes internos da gaiola.

Aliando os pareceres dos pilotos a respeito da ergonomia do veículo, que foram obtidos a partir de um questionário subjetivo, com a análise “RULA” (*Rapid Upper Limb Assessment*), realizada através, tanto de simulações utilizando o *software* CATIA V5, quanto da aplicação do questionário RULA a eles, resultaram na identificação de problemas posturais, ao se conduzir o carro. As posturas exercidas nos postos de trabalho são enquadradas de acordo com as angulações entre os membros e o corpo. Tilley (1993), aponta faixas de ângulos confortáveis, por membro, que atendem diferentes estaturas na posição de pilotagem.

O estudo tem como objetivo principal realizar as análises ergonômicas, e sugerir mudanças posturais, para assim, verificar possíveis problemas futuros com a atual dinâmica de pilotagem. Com isso, investigações ergonômicas são importantes para a equipe, uma vez que cada piloto desempenhe melhor a sua atividade se estiver sentindo-se confortável.

## 2 | OBJETIVOS

O objetivo desse estudo é analisar e identificar parâmetros posturais, a serem considerados em um projeto de um chassi tubular, baseado em estudos de Antropometria, normas RATBSB 2019 – Emenda 3 e questionários. Esses parâmetros serão avaliados a partir de questionários focados na prática da pilotagem e em simulações virtuais. Deve-

se encontrar pontos críticos no posicionamento de um piloto de competição Baja SAE da equipe Komiketo Baja UFSJ.

Posteriormente, serão determinados pontos que provoquem desconforto ao piloto. E ainda serão comparados com as simulações virtuais e os questionários subjetivos. Por fim, serão propostos planos de ação para solucionar os desconfortos indicados.

## 3 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 3.1 Ergonomia

A palavra ergonomia se origina do grego, sendo a junção dos termos “*ergon*”, que significa trabalho e “*nomos*”, que significa norma ou lei. Segundo a International Ergonomics Association (IEA) “a ergonomia é a disciplina científica que visa a compreensão fundamental das interações entre os homens e os outros componentes de um sistema, fazendo aplicações de princípios teóricos, dados e métodos com o objetivo de otimizar o bem-estar das pessoas e o desempenho global dos sistemas” (IIDA, 2005). De acordo com a Associação Brasileira de Ergonomia (ABERGO), a ergonomia (ou Fatores Humanos) é a disciplina científica que trata da compreensão das interações entre os seres humanos e outros elementos de um sistema, e a aplicação de teorias, princípios, dados e métodos, a projetos que visam otimizar o bem-estar humano e a performance global dos sistemas ([http://www.abergo.org.br/internas.php?pg=o\\_que\\_e\\_ergonomia](http://www.abergo.org.br/internas.php?pg=o_que_e_ergonomia)).

### 3.2 Antropometria

O termo antropometria provém do grego *ánthropos* (antropo), que significa homem, e *métron* (metria) correspondente à medida do homem. A área é parte integrante dos estudos da antropologia física, que se ocupa da determinação de medidas das dimensões e das proporções corporais externas (SILVA, 2007). De acordo com Lida(1997), pode-se dizer que a antropometria é o estudo que avalia e mensura as medidas físicas do corpo humano como um todo ou de suas partes como, por exemplo, altura, peso, medida de mãos e seus dedos, braços, pernas, coxas, quadril, ombros etc.

As medidas do corpo se diferenciam por diversos fatores nutricionais, climáticos, culturais, sexo, idade etc. Cada grupo populacional possui características antropométricas distintas, a Figura 1 mostra a diferença de membros de etnias distintas.

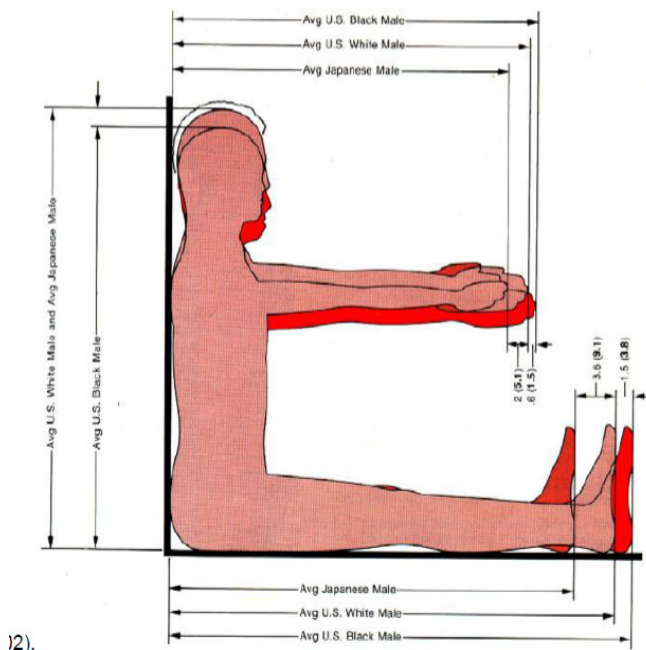


Figura 1. Diferentes medidas antropométricas.

Fonte: DRIFFIENT (1985).

Segundo Silva (2007), em um estudo ergonômico, é essencial a escolha do perfil antropométrico adequado para definir os parâmetros de projeto. Não há pesquisas confiáveis sobre as características antropométricas da população brasileira, uma observação com uma amostra pequena resultaria em dados incompletos, o que provocaria erros. Conforme lida (1997), os brasileiros se assemelham com os europeus mediterrâneos (portugueses, espanhóis, franceses e gregos) a diferença encontrada é inferior a 3%. Como a discrepância é muito pequena é preferível usar tabelas consolidadas a fazer levantamentos poucos expressivos.

### 3.2.1 Percentis

De acordo com Silva (2003), realizando análises das alturas de toda a população e obtendo a frequência de ocorrência delas, é possível definir uma medida da posição relativa de uma unidade observacional em relação a todas as outras, isto é, o percentil. Isso significa que, um indivíduo com o percentil 80, por exemplo, possui uma altura igual ou maior que 80% da população analisada.

Mesmo os percentis abrangendo 100% da população, devido a rentabilidade, as análises e os projetos ergonômicos são realizados com a faixa de percentis entre 5 e 95. Em um projeto no qual um veículo atenda ao percentil 100, seria muito grande e caro, além

de que, a probabilidade de encontrar uma pessoa dessa estatura é bem pequena (SILVA, 2007).

### 3.3 Avaliação ergonômica

Existem várias metodologias para avaliação ergonômica, deve-se escolher qual delas é mais adequada ao contexto e objetivos da análise. As análises foram realizadas utilizando a bibliografia de Tilley (1993) e o método RULA, pois ambos identificam problemas nas posturas de pilotagem e geram resultados que nos possibilitam traçar planos para melhorar a ergonomia.

#### 3.3.1 Método RULA

Conforme McAtamney e Corlett (1993), o Método RULA – *Rapid Upper Limb Assessment* (Avaliação Rápida dos Membros Superiores), propõe um protocolo de avaliação rápida dos potenciais riscos aos membros superiores em função da postura adotada e da carga externa a que o corpo é submetido.

Para a avaliação, foi criado um sistema de registro das posturas de trabalho, no qual o corpo humano foi dividido em dois grupos, A e B. O grupo A inclui braço, antebraço, punho e uma seção específica para o movimento de pronação (para baixo) e supinação (para cima) do punho. Já o grupo B, é formado pelo pescoço, tronco e pernas. Essa divisão possibilita abordar toda a postura corporal e quaisquer partes do corpo que interferem na postura dos membros superiores.

Cada parte corporal é dividida em faixas de pontuação. As faixas partem da pontuação 1, que corresponde a postura mais confortável, e são somados pontos conforme a exposição do movimento ou postura ao risco. Os lados do corpo, se necessário, deve ser analisado separadamente. Os esforços e os movimentos exercidos pelo corpo também possuem um sistema de pontuação. A análise é dividida em três etapas (MCATAMNEY; CORLETT, 1993).

#### 3.3.2 Primeira etapa: pontuação dos grupos

Na primeira fase é feita a análise do indivíduo em sua posição de trabalho. É dado uma pontuação por parte corporal dependendo da posição de cada membro. As pontuações, de acordo com a amplitude das partes corporais, dos grupos foram estabelecidas por McAtamney e Corlett (1993). As Figuras 2 e 3 apresentam o diagrama de pontuação dos membros presentes no grupo A e B, respectivamente.











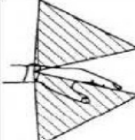
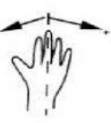
Escores	1	2	2	3	4	Ajustes
Braços	 20° de extensão a 20° de flexão	 > 20° de extensão	 20 a 45° de flexão	 > 45 a 90° de flexão	 ≥ 90° de flexão	+ 1 ombro elevado + 1 braço abduzido - 1 braço apoiado
	 60 a 100° de flexão	 < 60° de flexão ou > 100° de flexão				 + 1 Antebraço cruza o plano sagital + 1 Antebraço rotacionado externo ao tronco
	 0° Neutro ou meia inclinação de pronação ou supinação	 15° de flexão a 15° de extensão ou total pronação o supinação	 ≥ 15° de flexão ou extensão			 + 1 Desvio ulnar ou radial

Figura 2. Relação de pontos para o grupo A.

Fonte: Adaptado de MCATAMNEY e CORLETT (1993).



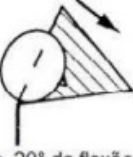



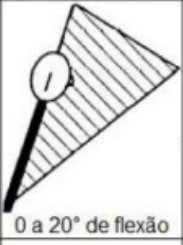
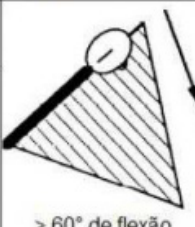
Escores	1	2	3	4	Ajustes
Pescoço	 0° a 10° de flexão	 10 a 20° de flexão	 > 20° de flexão	 Em extensão	+ 1 pescoço torcido ou rotacionado + 1 pescoço inclinado lateralmente
Tronco	 0° ou bem apoiado quando sentado	 0 a 20° de flexão	 0 a 20° de flexão	 > 60° de flexão	+ 1 tronco torcido ou rotacionado + 1 tronco inclinado lateralmente
Pernas	Pernas e pés bem apoiados e equilibrados	Pernas e pés não estão corretamente apoiados e equilibrados			

Figura 3. Relação de pontos para o grupo B.

Fonte: Adaptado de MCATAMNEY e CORLETT (1993).

Para encontrar a pontuação dos grupos, é necessário utilizar as Figuras 4 para o grupo A e 5 para o grupo B. Os membros possuem uma linha ou coluna subdividida em



diferentes notas. A pontuação final do grupo é o valor da intercessão das notas obtidas pelo avaliado em cada membro.

Tabela A - Pontuação da postura dos membros superiores									
Braço	Antebraço	Pontuação da postura do pulso							
		1		2		3		4	
		Rotação do pulso		Rotação do pulso		Rotação do pulso		Rotação do pulso	
		1	2	1	2	1	2	1	2
1	1	1	2	2	2	2	3	3	3
	2	2	2	2	2	3	3	3	3
	3	2	3	3	3	3	3	4	4
2	1	2	2	2	3	3	3	4	4
	2	2	2	2	3	3	3	4	4
	3	2	3	3	3	3	4	4	5
3	1	2	3	3	3	4	4	5	5
	2	2	3	3	3	4	4	5	5
	3	2	3	3	4	4	4	5	5
4	1	3	4	4	4	4	4	5	5
	2	3	4	4	4	4	4	5	5
	3	3	4	4	5	5	5	6	6
5	1	5	5	5	5	5	6	6	7
	2	5	6	6	6	6	7	7	7
	3	6	6	6	7	7	7	7	8
6	1	7	7	7	7	7	8	8	9
	2	8	8	8	8	8	9	9	9
	3	9	9	9	9	9	9	9	9
Pontuação do Grupo A									

Figura 4. Tabela de pontuação do Grupo A.  
 Fonte: Adaptado de MCATAMNEY e CORLETT (1993).

Tabela B - Pontuação da Postura dos Membros Inferiores												
Pesçoço	Pontuação da Postura do Tronco											
	1		2		3		4		5		6	
	Pernas		Pernas		Pernas		Pernas		Pernas		Pernas	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	1	3	2	3	3	4	5	5	6	6	7	7
2	2	3	2	3	4	5	5	5	6	7	7	7
3	3	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	7
4	5	5	5	6	6	7	7	7	7	7	8	8
5	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8
6	8	8	8	8	8	8	8	9	9	9	9	9
Pontuação do Grupo B												

Figura 5. Tabela de pontuação do Grupo B.  
 Fonte: Adaptado de MCATAMNEY e CORLETT (1993).

### 3.3.2.1 Segunda etapa: pontuação da postura e da carga

Para uma análise completa da condição de trabalho e dos riscos que o corpo é submetido, deve-se considerar os movimentos realizados pelo trabalhador e a força exercida por ele. Foi criado um sistema de pontuação em que as notas aumentam conforme o desconforto, partindo da nota 0, a mais confortável. As Figuras 6 e 7 mostram a nota relativa aos tipos de movimento e a cada carga fixa, respectivamente.

Pontuação	Contração Muscular
0	Postura fundamentalmente dinâmica, postura estática inferior a 1 minuto, e não repetitiva.
1+	Postura estática prolongada por período superior a 1 minuto.
2+	Postura repetitiva, mais que 4 vezes por minuto.

Figura 6. Tabela de pontuação da contração muscular.

Fonte: Adaptado de MCATAMNEY e CORLETT (1993).

Pontuação	Força e Carga
0	Menor que 2 kg – Intermitente.
1+	Entre 2 kg e 10 kg. – Intermitente.
2+	Entre 2 e 10 kg. – Estático e Intermitente.
3+	Maior do que 10 kg. – Choque.

Figura 7. Tabela de pontuação de força e carga.

Fonte: Adaptado de MCATAMNEY e CORLETT (1993).

### 3.3.2.2 Terceira etapa: somatório da pontuação e análise

O objetivo da terceira etapa é obter um número que define o nível de ação necessário para sanar os problemas ergonômicos. Para isso, primeiramente, somam-se as pontuações referentes a primeira e segunda etapas de cada grupo. Assim obtêm-se os valores finais dos grupos A e B. O esquema do somatório de pontos é indicado na Figura 8 (MCATAMNEY; CORLETT, 1993).

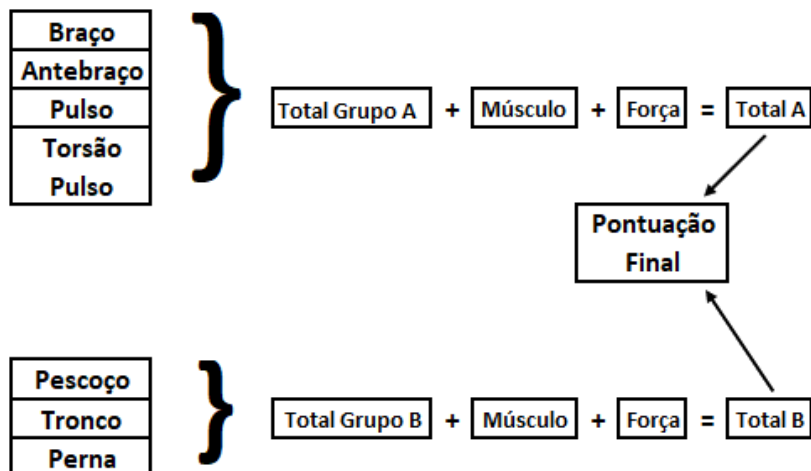


Figura 8. Somatório de pontuação.

Fonte: Adaptado de MCATAMNEY e CORLETT (1993).

Os valores finais dos grupos A e B são introduzidos na primeira coluna e primeira linha da Figura 9, respectivamente. A pontuação final é obtida pela interseção do total A com o total B.

Tabela C							
	1	2	3	4	5	6	7+
1	1	2	3	3	4	5	5
2	2	2	3	4	4	5	5
3	3	3	3	4	4	5	6
4	3	3	3	4	5	6	6
5	4	4	4	5	6	7	7
6	4	4	5	6	6	7	7
7	5	5	6	6	7	7	7
8+	5	5	6	7	7	7	7

→ Total B

↓

Total A  Pontuação Final

Figura 9. Tabela de pontuação final.

Fonte: Adaptado de MCATAMNEY e CORLETT (1993).

Por fim, com a criação de uma escala de níveis de risco de ação (Figura 10), analisou-se os resultados, servindo como um guia para o nível de risco, necessidade de ação e a condução de medidas mais aprofundadas (MCATAMNEY; CORLETT, 1993).

Nível 1	Pontuação	Análise
1	1 - 2	O risco é fraco e considerado como aceitável se o esforço não for mantido ou repetido por um período muito longo.
2	3 - 4	Requer um estudo mais avançado e modificações podem ser requeridas.
3	5 - 6	Requer um estudo avançado e modificações são necessárias sem ser num futuro imediato.
4	Maior que 7	Requer um estudo avançado e modificações são necessárias imediatamente.

Figura 10. Níveis de risco.

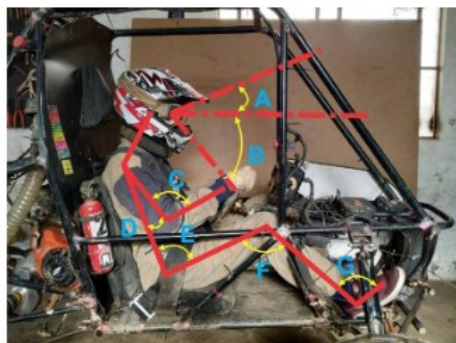
Fonte: Adaptado de MCATAMNEY e CORLETT (1993).

### 3.3.3 Análise RULA pelo software CATIA V5

O CATIA V5 é um programa de CAD (*Computer Aided Design*), lançado em 1998 pela IBM (<https://www-03.ibm.com/press/us/en/pressrelease/2564.wss>). Dentro do ambiente do *software* há a opção *human builder*, que cria um manequim, totalmente manipulável e modificável, sendo possível alterar as dimensões de seus membros, posicioná-lo e ainda aplicar a análise RULA. Executar a análise RULA, utilizando o CATIA V5, é uma forma de avaliar a ergonomia do veículo ainda na sua fase de projeto.

### 3.3.4 Análise de ângulos dos membros

Tilley (1993), define uma posição confortável de pilotagem para diferentes estaturas. A partir dos ângulos confortáveis dos membros dos percentis 5 e 95, ele define uma faixa de angulação que atende a 90% da população. Encontram-se na Figura 11 os ângulos que serão analisados e suas respectivas faixas confortáveis.



Ângulos	A°	D°	E°	F°	G°
Faixa	110 a 120	10 a 14	95 a 100	110 a 120	85 a 110

Figura 11. Ângulos analisados e as faixas confortáveis.

Fonte: Autoria própria.

### 3.3.5 Questionário subjetivo

A fim de obter um *feedback* dos pilotos a respeito de alguns aspectos ergonômicos do carro, aplica-se um questionário subjetivo como o da Figura 12. Com isso, é possível adquirir informações sobre a experiência de pilotagem que o veículo proporciona.

Avaliação Ergonômica de um Baja							
Piloto:							
Duração da Prova:							
Altura:	Peso:		Data:				
Acesso (Mínimo: 1, Máximo: 7)							
Pedais	1	2	3	4	5	6	7
Volante	1	2	3	4	5	6	7
Assento	1	2	3	4	5	6	7
Parâmetros físicos (Mínimo: 1, Máximo: 7)							
Temperatura	1	2	3	4	5	6	7
Vibração	1	2	3	4	5	6	7
Conforto (Mínimo: 1, Máximo: 7)							
Espaço do assento	1	2	3	4	5	6	7
Inclinação do assento	1	2	3	4	5	6	7
Posição dos braços	1	2	3	4	5	6	7
Posição das pernas	1	2	3	4	5	6	7
Posição dos pés	1	2	3	4	5	6	7
Comentários gerais							

Figura 12. Questionário subjetivo.

Fonte: SILVA (2007).

## 4 | METODOLOGIA

### 4.1 Materiais

O veículo utilizado foi o protótipo KB 08 da equipe Komiketo Baja UFSJ. O carro possui um chassi tubular de aço SAE 4130, um banco com angulação de 10° com a vertical, encosto de cabeça e um volante com diâmetro de 250mm e 35° de inclinação com a vertical.

### 4.2 Métodos

A simulação pelo CATIA V5 e análise segundo Tilley (1993). foram feitas utilizando seis pessoas diferentes. Três delas pilotos da equipe e três com os percentis 05% feminino, 50% e 95% masculino respectivamente. Porém os questionários subjetivos e RULA foram aplicados somente aos pilotos, pois somente eles possuem experiência de pilotagem com esse protótipo. Todas as análises que utilizaram o carro construído foram feitas com o veículo estático. Para realizar as investigações pelo *software* o chassi, assoalho, banco, encosto de cabeça, pedais de acelerador e freio do carro foram desenhados no *SolidWorks* e exportados no formato “*step*” para o CATIA. A Figura 12 mostra todos os percentis a serem analisados.

Percentil	Estatura (m)
52% Piloto 1	1,76
35% Piloto 2	1,73
46% Piloto 3	1,75
50% Masculino	1,755
05% Feminino	1,524
95% Masculino	1,865

Figura 12. Tabela de percentis.

Fonte: Autoria própria.

## 5 | ANÁLISES E RESULTADOS

### 5.1 Questionário RULA

Para o desenvolvimento do questionário RULA realizado com os três pilotos, foi criado um sistema de registro das posturas avaliadas a partir de um formulário no Google Forms. Sendo este aplicado individualmente. Posteriormente, com os resultados obtidos nessa análise, um sistema de determinação de pontuação é criado em planilhas no Excel,

para indicar as respectivas pontuações de cada membro do corpo de acordo com as Figuras 4 e 5.

O primeiro piloto entrevistado é o mais experiente da equipe, possuindo um maior conhecimento do carro analisado e com mais horas de pilotagem no mesmo, em competições e testes, assim também com outro protótipo anterior. O segundo, possui uma experiência menor que o anterior, participando de algumas competições e testes, mas ainda sim com um número de horas de pilotagem bem inferior. O último condutor questionado é o que menos teve contato com o protótipo analisado, participando apenas de alguns testes realizados pela equipe, sem participação em competições.

De modo geral, os três interrogados na análise, mostraram incômodos análogos para alguns membros, eles apresentaram pontuação final 7. Para o braço todos finalizaram com índice 3, é uma escala média, mas é importante ressaltar que se expostos a períodos muito longo pode causar dores. O antebraço deve ter atenção extrema, pois todos tiveram nota máxima, indicando grande desconforto. O punho querer um alerta, apontando falta de conforto de sua posição de acordo com o tempo de exposição ao dirigir o carro.

Dos membros do grupo B, o mais preocupante é o pescoço, onde apontam desconforto após certas provas e testes realizados. O tronco, mesmo sendo indicado resultado de nível baixo pelos colaboradores, é relevante dizer que os problemas apontados no pescoço pode ser consequência de mal posicionamento do tronco. As Figuras 13 e 14 mostram as pontuações indicadas pelos pilotos, por membro do corpo, de acordo com as Figuras 2 e 3.

Piloto 1					Piloto 2				
Grupos	Membros	Pontuação	Ajustes	Total	Grupos	Membros	Pontuação	Ajustes	Total
Grupo A	Braço	2	1	3	Grupo A	Braço	2	1	3
	Antebraço	2	1	3		Antebraço	2	1	3
	Punho	3	1	4		Punho	2	-	2
	Força/Carga	2	-	2		Força/Carga	1	-	1
	Musculo	2	-	2		Musculo	2	-	2
Grupo B	Pescoço	3	-	3	Grupo B	Pescoço	2	-	2
	Tronco	2	-	2		Tronco	2	-	2
	Pernas/Pés	1	-	1		Pernas/Pés	1	-	1
	Musculo	2	-	2		Musculo	2	-	2
	Força/Carga	2	-	2		Força/Carga	3	-	3

Figura 13. Pontuação dos pilotos 1 e 2.

Fonte: Autoria própria.

Piloto 3				
Grupos	Membros	Pontuação	Ajustes	Total
Grupo A	Braço	2	1	3
	Antebraço	2	1	3
	Punho	2	-	2
	Força/Carga	2	-	2
	Musculo	1	-	1
Grupo B	Pescoço	3	-	3
	Tronco	2	-	2
	Pernas/Pés	1	-	1
	Musculo	2	-	2
	Força/Carga	3	-	3

Figura 14. Pontuação do piloto 3.

Fonte: Autoria própria.

## 5.2 CATIA V5

### 5.2.1 Percentil 05% feminino

O manequim com percentil 05% feminino, mostrado na Figura 15, obteve a pontuação final 7, o que nos diz que é uma posição desconfortável para a pilota. Mesmo considerando algumas regulagens de pedais que o carro possui, é difícil enquadrar este como sendo confortável, pois o banco não possui ajustes.

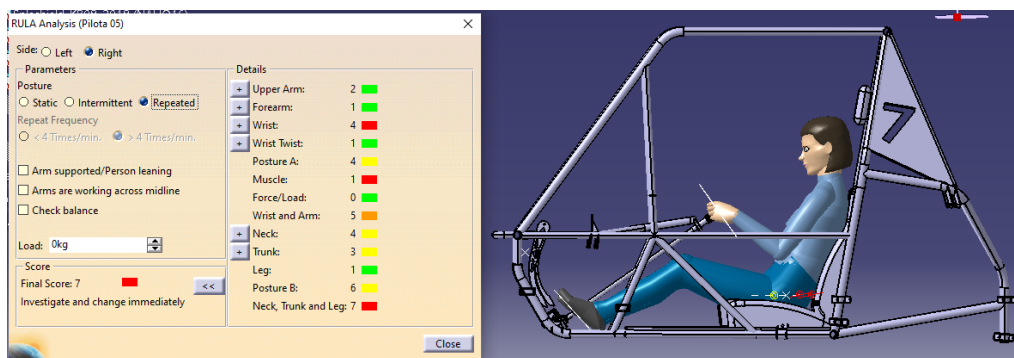


Figura 15. Percentil 05% feminino.

Fonte: Autoria própria.



O braço do manequim não indica desconforto para o movimento dele, estando em uma posição que não gera grandes riscos. O antebraço não mostra incômodos para o uso do veículo e não requer ajustes para essa análise. O punho não demonstrou estar na posição correta, obteve o maior índice de sua escala. A angulação de alguns dos membros superiores dificulta qualquer movimento do piloto.

O pescoço do manequim demonstrou um nível médio, esse é devido a angulação do banco em conjunto com o uso de capacete e o protetor de pescoço. O tronco ficou no meio termo, pois a angulação e altura do assento para um condutor de baixa estatura desfavorece o conforto. As pernas levaram um índice baixo, considerando os ajustes de pedais do carro. Ainda assim a grande extensão dos membros para alcançá-los pode causar desconforto.

### 5.2.2 Percentil 50% masculino

Para o manequim de percentil 50% masculino foi constatada a pontuação final 6 (Figura 16). Sendo assim considerada uma posição pouco desconfortável e pode necessitar de alguns ajustes. Esse manequim representa um homem médio, que também mais se compara com os pilotos analisados.

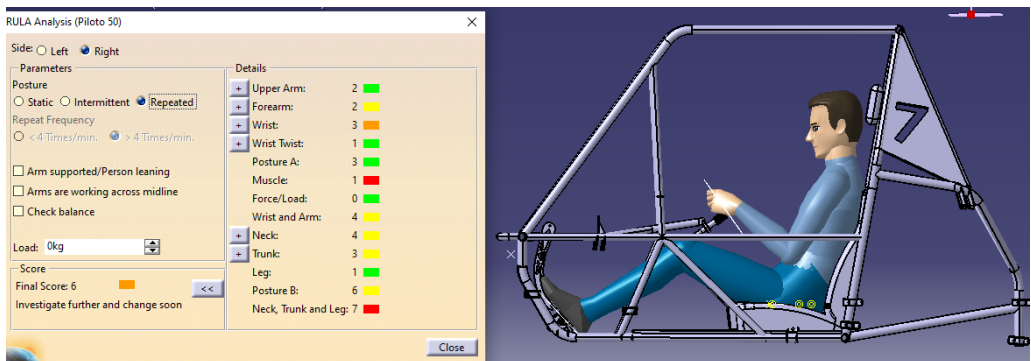


Figura 16. Percentil 50% masculino.

Fonte: Autoria própria.

Esse percentil não apresentou riscos evidentes ao piloto nos deslocamentos do braço, pois não foi considerado elevações do ombro. O antebraço, no qual indica pouco desconfortável, não é tão preocupante se não for exposto por um longo período. Para o punho foi apontado um índice mais elevado, pela necessidade de movimentação em relação a angulação do volante, gera certo incômodo, mas não é preciso tanta atenção.

O pescoço gerou certo desconforto para o manequim, a inclinação que o banco possui e o campo de visão do piloto indicam incômodo na pilotagem. O tronco demonstrou

também, ser desconfortante, mesmo sendo uma pontuação média devemos ter certa atenção quanto ao membro, pois a inclinação e curvatura do assento interfere diretamente na distribuição de carga do tronco. As pernas não apresentaram riscos ao piloto, mas como o tornozelo está quase na mesma altura do quadril, se exposto por um longo tempo, pode acarretar grande desconforto.

### 5.2.3 Percentil 95% masculino

A análise com o manequim 95%, que é o de maior estatura, se deu como pontuação final 4. Com esse índice não se requer tanta atenção como os anteriores. Apesar do habitáculo do piloto ser bastante restrito, a análise nos mostra um bom conforto para este, como visto na Figura 17.

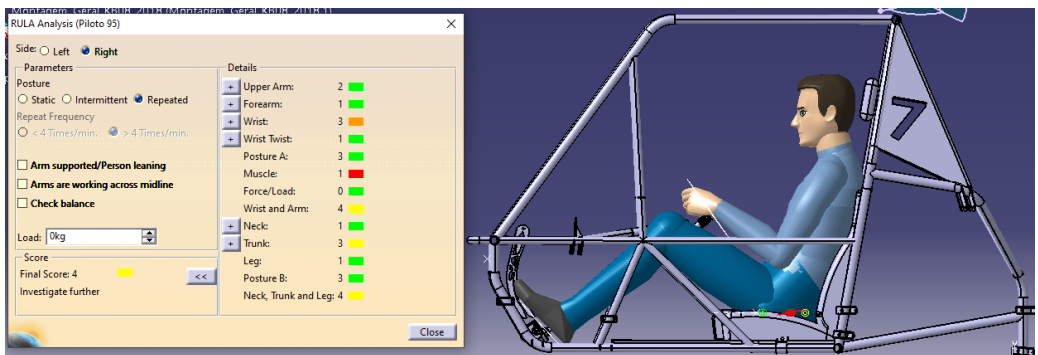


Figura 17. Percentil 95% masculino.

Fonte: Autoria própria.

O braço desse manequim não é preocupante, pode ser que gere algum desconforto de acordo com o tempo de pilotagem. No antebraço, apesar de não ser desconfortável, esta posição pode acarretar algum desconforto em longos períodos. O punho mostrou índice mais elevado, isto requer uma maior atenção para o membro, pois como o condutor é de grande estatura, a rotação do punho com relação ao volante se torna complicada.

O pescoço não aponta grandes problemas, nesse caso a angulação do assento e sua altura não interferiram no conforto do membro. O tronco já requer um pouco mais de cuidado, um dos motivos de ter ocasionado isso pode ser a distância entre o volante e o piloto, sendo curta, causando uma flexão na coluna ao movimentar o volante. As pernas primeiramente não geram desconforto, mas como o piloto está em uma posição em que seus joelhos se encontram flexionados, em um período muito longo pode aparecer desconforto.

### 5.2.4 Pilotos

Como os três pilotos da equipe possuem praticamente a mesma altura e o mesmo peso, apesar da análise virtual ser feita individualmente, os resultados obtidos foram idênticos para ambos, como podemos ver nas Figuras 18, 19 e 20. Também se assemelham com o percentil 50% masculino, sendo uma estatura média, comparada com a maioria dos condutores. Eles apresentaram uma pontuação final 6, onde sabemos que existe algum desconforto e pode necessitar de algumas modificações.

Para o braço o índice apontado foi 2, a posição não traz grandes riscos aparentemente, mas vale ressaltar que alguns parâmetros não são considerados pelo software. O mesmo acontece com o antebraço, indicando a pontuação 1. O punho já quer um pouco mais de atenção, mostrando o índice 3, devido a movimentação do punho com relação a angulação do volante, se exposto a um período mais longo, pode acarretar grande desconforto.

O pescoço mostra que há certo incômodo relacionado a ele, apresentando índice 4, um dos motivos pode ser a consideração dos pilotos com o capacete e o protetor de pescoço, além da inclinação e altura do banco. No tronco o índice que aparece é 3, levando em conta os mesmos aspectos do pescoço, podemos dizer que para longos períodos o desconforto será evidente. Do mesmo modo que os outros manequins, as pernas indicaram a pontuação 1, que não oferece riscos notórios, mas dependendo do tempo de duração de pilotagem, incomodidades palpáveis podem surgir.

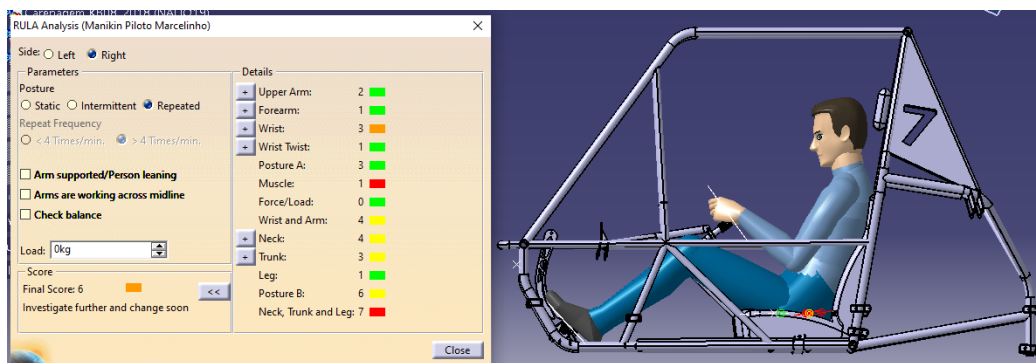


Figura 18. Análise do Piloto 1.

Fonte: Autoria própria.

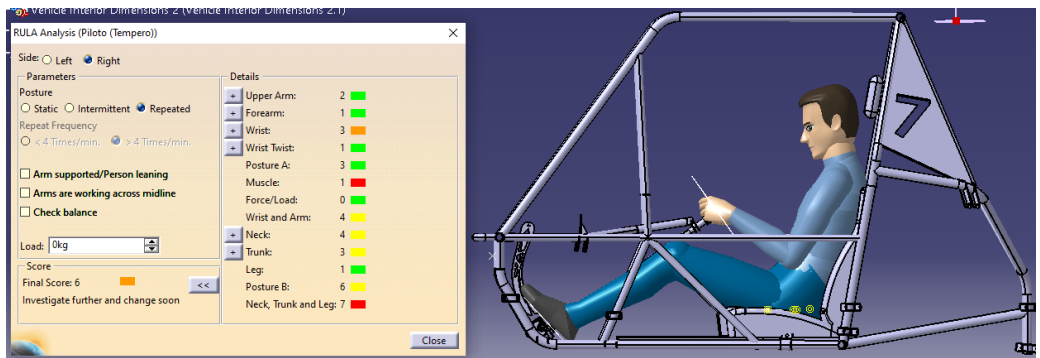


Figura 19. Análise do Piloto 2.

Fonte: Autoria própria.

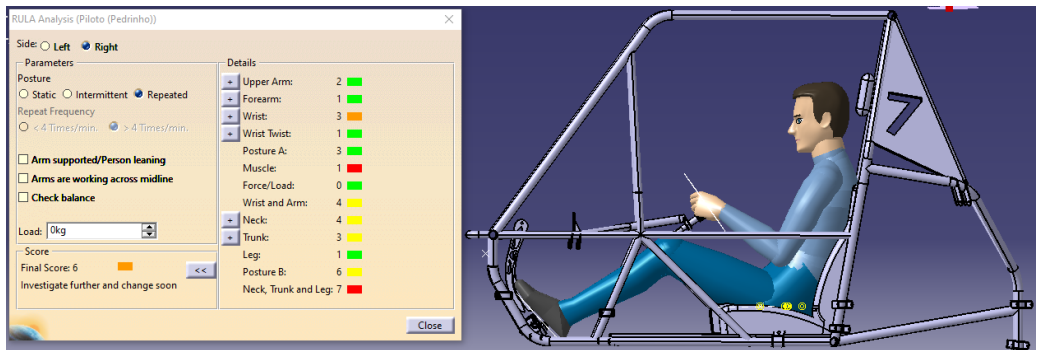


Figura 20. Análise do Piloto 3.

Fonte: Autoria própria.

### 5.3 Tilley

Foi realizado um ensaio, no qual três voluntários, cada um representando, respectivamente, os percentis 5% feminino, 50% masculino e 95% masculino e os três pilotos da equipe, simularam estar pilotando o protótipo, tornando possível a análise das suas posturas. A fim de utilizar as faixas de ângulos confortáveis das articulações, definidas por Tilley (1993), para identificar problemas posturais e possíveis soluções para eles.

As Figuras 21 e 22 ilustram quais foram as condições do ensaio e, também, os ângulos das articulações que foram medidos e suas respectivas denominações. Os voluntários representando os diferentes percentis, estão retratados na Figura 21. Os pilotos: 1, 2 e 3 estão apresentados na Figura 22, respectivamente. Os resultados das aferições dos ângulos das articulações são exibidos na Figura 23.

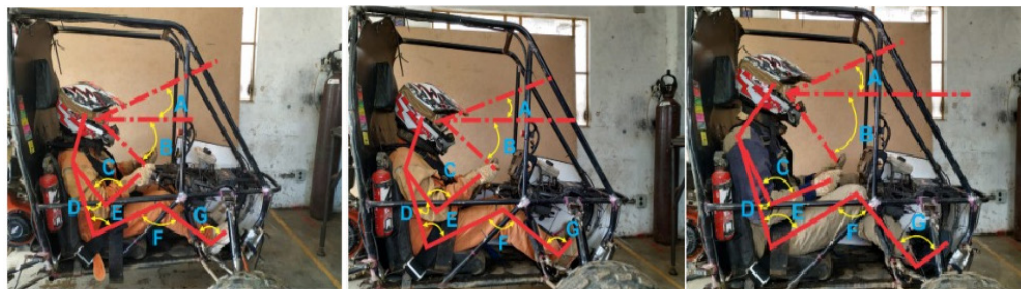


Figura 21. Voluntários e os ângulos analisados.  
 Fonte: Autoria própria.



Figura 22. Pilotos 1,2 e 3 e os ângulos analisados.  
 Fonte: Autoria própria.

Ângulos		A°	D°	E°	F°	G°
Faixa		110 a 120	10 a 14	95 a 100	110 a120	85 a 110
Pilotos	Percentil 5%	114	19	97	119	96
	Percentil 50%	117	12	104	114	93
	Percentil 95%	103	10	85	105	101
	Piloto 1	117	12	104	114	93
	Piloto 2	114	19	97	121,5	96
	Piloto 3	117	12	104	114	93

Figura 23. Resultados das aferições dos ângulos das articulações.  
 Fonte: Autoria própria.

### 5.4 Questionário subjetivo

A Figura 24 mostra os parâmetros considerados nas entrevistas com os pilotos, suas respectivas respostas e a média delas. Os três foram escolhidos por já terem tido

experiência com o carro analisado. Mesmo sendo o primeiro com muita experiência e o terceiro com quase nenhuma. Eles possuem altura pouco variada (1,76m; 1,73m; 1,75m) e pesos não tão distintos, respectivamente (58Kg, 62Kg, 52Kg). As médias respectivas, de altura e peso, deles são 174,67m e 57,33 Kg.

Para o estudo foi considerado o período de 4h de rodagem, a fim de ponderar a prova de Enduro na Competição Baja SAE Brasil. Foi questionado aos pilotos sobre o assento e o conforto de certas posições, acesso a alguns comandos e parâmetros físicos como temperatura e vibração.

Pilotos	Acesso			Parâmetros Físicos		Conforto				
	Pedais	Volante	Assento	Temperatura	Vibração	Esp. Assento	Incl. Assento	Pos. Braços	Pos. Pernas	Pos. Pés
1	3	5	5	1	6	2	5	7	6	6
2	2	3	4	2	4	2	4	4	3	2
3	2	3	3	3	4	2	2	4	2	4
Média	2,33	3,67	4	2	4,67	2	3,67	5	3,67	4

Figura 24. Resultados do questionário subjetivo.

Fonte: Autoria própria.

O acesso aos pedais nos deu uma média de 2,33 o que não nos dá grande preocupação quanto ao comando. O volante já traz um pouco mais de atenção, mostrando a média 3,67, pois quando expostos ao período considerado na análise o desconforto pode ser evidente. O assento obteve 4 de média, indicando que não é a melhor performance e algo pode ser feito para melhorar o conforto, pois este pode influenciar totalmente o desempenho dos pilotos nas pistas.

A temperatura considerada pelos entrevistados obteve média 2, que não mostra grande preocupação. O que mais influencia nesse quesito é o macacão utilizado pelos pilotos. A vibração admitiu média 4,67, pois nem todas as irregularidades da pista são absorvidas pela suspensão e chassi. A vibração do motor também é ressaltada para esta questão.

O espaço do assento assumiu uma média 2, para os entrevistados esse espaçamento ainda é considerado justo. A inclinação do assento admitiu média 3,67, gerando bastante desconforto nessa parte. A posição dos braços ganhou média 5, onde fica evidente o incômodo nesta parte. Isso se dá ao fato do período de duração da prova analisada. As pernas levaram uma média 3,67, apontando incomodidade do piloto exposto a longos períodos. Os pés tiveram a média 4, levando em consideração os esforços exercidos ao frear e acelerar o carro, é notório o desconforto.



## 5.5 Comparação de resultados

Comparando os resultados obtidos a partir das simulações e do questionário RULA aplicado aos pilotos, nota-se pontos de desconforto que podem necessitar de análises mais aprofundadas e modificações para projetos futuros. O manequim 50% masculino e os pilotos, de estatura média, mostram ser mais confortáveis que o menor percentil (05% feminino) e um pouco mais desconfortável que o maior (95% masculino). Nesse caso o de menor porte tem mais dificuldade de alcançar toda extensão dos pedais e movimentação do volante. O de maior altura por possuir uma maior envergadura, tem um bom acesso aos comandos do veículo, mas pelo tamanho do habitáculo do piloto e o período de pilotagem, sua posição pode ser desconfortante.

Apesar da análise virtual dos pilotos geraram o mesmo resultado, no questionário individual aplicado mostra resultados pouco distintos, mas não discrepantes, pois cada piloto possui nível de experiência diferente e o *software* não leva em consideração alguns parâmetros apontados por eles. Observando isso, alguns pontos críticos foram destacados, dentre eles tornam-se como principais o tronco e o punho. O pescoço também requer um pouco de atenção, que em conjunto com o tronco, demonstra que a inclinação do banco não é a mais adequada para o protótipo. O incômodo dos punhos pode estar relacionado a angulação do volante juntamente com o tempo exposto de pilotagem.

No questionário subjetivo aplicado aos pilotos e nas observações utilizando a bibliografia de Tilley (1993), manifestam-se maior atenção para o assento, posição dos braços e tronco. Se comparado ao questionário RULA aplicado aos mesmos e a simulação virtual, é notório esses pontos críticos abordados, mesmo não sendo de mesma intensidade, mas ainda assim é coerente entre as análises feitas e a noção dos entrevistados.

## 6 | CONCLUSÃO

As análises ergonômicas realizadas forneceram dados que nos possibilitam concluir que no protótipo KB08 existem alguns problemas relacionados a posição de certos componentes internos da gaiola, que influenciam diretamente no conforto dos membros do corpo. Apesar de mostrarem intensidades diferentes para cada método utilizado, no geral algumas regiões se destacam por apresentarem maiores níveis de incômodo. Esses erros identificados, geram os desconfortos percebidos, principalmente nos punhos, pescoço e tronco.

Verificando a inclinação do volante em relação a vertical, observou-se a necessidade de grande atenção para os punhos, onde foi indicado enorme desconforto. Considerando os pilotos utilizando o protetor de pescoço, capacete e levando em conta o encosto de cabeça, o pescoço apresentou resultados que precisam de observações mais aprofundadas. A angulação do banco relacionada a vertical resultou em desconfortos preocupantes para o tronco do piloto, principalmente se exposto a longos períodos.

Conclui-se que é necessário reavaliar a posição dos componentes do veículo, sendo eles, banco, volante e encosto de cabeça. Para sanar os problemas ergonômicos enfrentados, avaliações e estudos ainda mais desenvolvidos devem ser realizadas pela equipe. Principalmente, relacionados aos pontos críticos encontrados nesse trabalho, tal como, um novo projeto para o banco, no qual com a inclinação e altura corretas, muitas das contrariedades podem ser evitadas, levando ao condutor um maior conforto e consequentemente mais rendimento ao realizar as provas da competição. Em qualquer que seja o posto de trabalho de uma pessoa, quando ela está se sentindo ergonomicamente agradável, sua produtividade aumenta significativamente na realização das atividades exigidas.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Equipe Komiketo Baja UFSJ pela motivação e oportunidade de aplicar os conhecimentos aprendidos em sala de aula. Agradecemos à Universidade Federal de São João del-Rei pelo auxílio e cooperação. Agradecemos à FAPEMIG, pelo suporte à nossa equipe, permitindo o desenvolvimento desse estudo.

## REFERÊNCIAS

ABERGO. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ERGONOMIA. Disponível em: <[http://www.abergo.org.br/internas.php?pg=o\\_que\\_e\\_ergonomia](http://www.abergo.org.br/internas.php?pg=o_que_e_ergonomia)>. Acesso em: 20 jun. 2020.

CAPELETTI, B. H. G. M. Aplicação do método RULA na investigação da postura adotada por operador de balanceadora de pneus em um centro automotivo. 2013. 42 f. Monografia (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013.

IIDA, I. Ergonomia: projeto e produção. Edgard Blucher, 2005.

JUNIOR, J. R. M. Diretrizes para o uso das ferramentas de avaliação de carga física de trabalho em ergonomia: equação Niosh e protocolo RULA. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção – Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

JUNNIOR, R. C. D.; SILVA, B. C. B.; CANEDO, G. R. Aplicação do método RULA (rapid upper limb assessment) em um laboratório didático. Joinville, SC, Brasil, 2017.

KALESKI, R. S. ANÁLISE ERGONÔMICA DO TRABALHO: Revisão Integrativa de Ferramentas ou Métodos Ergonômicos, 2017.

LOPES, P. R.; SERBENA, H. J.; AZEVEDO, D. Análise ergonômica de postura de motorista. Universidade Federal do Paraná, 2004.

MCATAMNEY, L. AND CORLETT, E.N. RULA: A survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. Appl. Ergonomics, v.24, p.91–99, 1993.



MOREIRA, F. C.; LEAL, J. C.; FERREIRA, Y. V. S. Aplicação de Realidade Aumentada para otimização Ergonômica de Flow Rack Industrial. AEDB, Rio de Janeiro, 2018.

SAE BRASIL. REGULAMENTO BAJA SAE BRASIL, 2020. Disponível em: <<http://portal.saebrasil.org.br/programas-estudantis/baja-sae-brasil>>. Acesso em: 10 set. 2020.

SILVA, M. B. Avaliação Ergonômica de um Kart, 2007.

# CAPÍTULO 18

## UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DO USO DA AUTOMAÇÃO NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO BRASIL

*Data de aceite: 01/06/2021*

*Data da submissão: 24/02/2021*

**Igor Moreno Mamedes**

Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em  
Eficiência Energética e Sustentabilidade  
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Campo Grande – MS  
<http://lattes.cnpq.br/6087237238263094>

**Andrea Teresa Riccio Barbosa**

Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em  
Eficiência Energética e Sustentabilidade  
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Campo Grande – MS  
<http://lattes.cnpq.br/4025767578391844>

**RESUMO:** Com o progresso tecnológico dos últimos anos, foi possível perceber a evolução da automação em todas as áreas da sociedade, predominantemente associada com o aumento da produtividade, enquanto medidas relacionadas a eficiência energética assumiam papel coadjuvante. Esse trabalho propõe uma análise sistemática de estudos publicados no Brasil que obtiveram resultados relacionados a eficiência energética com o uso de automação. O banco de dados do Portal de Periódicos Capes e o software livre Harzing's Publish or Perish foram utilizados como fonte e método de identificação, seleção e análise sistemática. Programas de incentivo a eficiência energética do governo indicam escassez do uso de automação para esse fim, o que pode ser verificado nos

resultados dessa pesquisa, porém, foi possível verificar pelas evidências encontradas que os investimentos na área são viáveis. Redução no consumo de energia elétrica foi observado no setor industrial, em sistemas de bombeamento e hidráulica em geral, setores de agricultura e metalúrgico. Também foi verificado redução dos custos com o uso de automação em residências e ambientes de escritório, somada a tecnologias inovadoras como Internet das Coisas, que se popularizaram e se baratearam, permitindo a implantação de minicomputadores associados com sensores para controle automático dos sistemas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Eficiência energética, automação e controle em edificações, automação industrial.

### A SYSTEMATIC REVIEW OF AUTOMATION FOR ENERGY EFFICIENCY IN BRAZIL

**ABSTRACT:** With the technological progress perceived over the years, it was possible to see the evolution of automation in all areas of society, predominantly associated with increased productivity, while measures related to energy efficiency assumed a supporting role. This work proposes a systematic analysis of studies carried out in Brazil that obtained results related to energy efficiency with the use of automation. The database of the CAPES Periodic Portal and the software Harzing's Publish or Perish were used as a source and method of identification, selection and systematic analysis. Energy efficiency programs point to the scarcity of the

use of automation for this purpose, which can be seen in the results obtained in the research, however, it was possible to verify through the evidence found that investments in the area are viable. Energy savings was observed in the industrial sectors, such as pumping and hydraulic systems in general, the agricultural sector and the metallurgical sector. It was also verified the reduction of expenses with the use of home automation and office environments, making use of innovative technologies such as IoT, which became popular and suffered cheapness, allowing the implantation of minicomputers associated with sensors for automatic control of the systems.

**KEYWORDS:** Energy efficiency, building automation and control, industrial automation.

## 1 | INTRODUÇÃO

Desde a Revolução Industrial, a energia se tornou um dos principais insumos nas atividades econômicas dos países. O consumo energético hoje é 200 vezes maior do que era há 500 anos. O suprimento dessa necessidade energética implicou a utilização em grande escala de combustíveis fósseis, que ainda hoje dominam a matriz energética mundial e são a principal fonte de emissão de gases poluentes (MOREIRA, 2019).

O Brasil expressou um aumento significativo de energias renováveis em sua matriz no ano de 2018. A repartição da Oferta Interna de Energia (OIE) contou com uma parcela de 45,3% de renováveis, em comparação com a parcela do ano anterior, que correspondeu a 43%. Essa diferença pode ser explicada pelo incremento da geração hidráulica e eólica, aumento da oferta de lixo e biodiesel, redução da oferta de petróleo e derivados e a redução da oferta de gás natural (BRASIL, 2019a).

A geração de energia elétrica atingiu 601,4TWh, resultado 2% superior ao ano de 2017, contando com um crescimento de 4,9% na geração hídrica, que é a principal fonte de produção de energia elétrica no Brasil. Isto contribuiu para que a participação de renováveis na matriz elétrica fosse de 83,3%. Já o consumo final foi de 535,4TWh, o que implicou o aumento de 1,4%. Os setores que apresentaram maior consumo foram o industrial, com 37,5%, e o residencial, com 25,4%. A verificação de tal panorama energético pode significar a possibilidade de implantação de medidas de eficiência energética no Brasil (BRASIL, 2019b).

Eficiência energética é o conjunto de uma série de medidas de naturezas diversas que são tomadas para a redução no consumo de energia no atendimento às demandas da sociedade por serviços e processos, como modificações ou aperfeiçoamentos tecnológicos ao longo da cadeia ou melhor organização, conservação e gestão energética (PATTERSON, 1996).

No Brasil, uma das primeiras políticas públicas voltadas para a eficiência energética se deu com a criação do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), em 1985, que desempenhava atividades como distribuição de manuais e panfletos com orientações para diversos setores. Foi somente cinco anos mais tarde que o programa

realizou ações de maior impacto, como projetos de demonstração, treinamentos e formação técnica para profissionais da área (ALTOÉ *et al.* 2017).

Em 2011, o Ministério de Minas e Energia aprovou, através da portaria 594, o Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf), que estabelece metas e diretrizes para economia de energia no contexto do planejamento energético nacional, publicado no mesmo ano. O PNEf foi criado no âmbito do PNE 2030, e propõe o fortalecimento do PROCEL, bem como o trabalho conjunto. Nele, também é possível verificar a participação incipiente de propostas de automação como medida estratégica na promoção da eficiência energética (BRASIL, 2011).

Automação é um termo que foi cunhado na época do fordismo, nos anos 40, por um engenheiro que descrevia vários sistemas em que ações e processos eram desenvolvidos de forma automática, sem a intervenção humana. O advento tecnológico, com computadores e dispositivos de *hardware*, possibilitou o barateamento da automação, impulsionando a produtividade. Foi possível fazer a substituição de tarefas perigosas ou pesadas por mecanização, além do aumento na frequência e rapidez de produção com mão de obra mais barata, melhor controle de qualidade através de inspeções, entre outros (LAMB, 2015).

Embora haja divergência na literatura, muitos autores acreditam que vivemos atualmente a Quarta Revolução Industrial. Ela nos traz tecnologias como a *Internet of Things* (IoT), paradigma de comunicação sem fios que possibilita a conexão de objetos do dia a dia à Internet, de modo que possam colaborar entre si com o objetivo de executar determinadas funções (LIAO *et al.*, 2018).

Amplamente difundidas atualmente estão as plataformas digitais, que consistem em ambientes digitais capazes de oferecer serviços de baixo custo, sendo a principal delas a própria Internet, possibilitando a economia sob demanda. Essas tecnologias associadas a Quarta Revolução Industrial tendem impulsionar a produtividade das empresas, aumentando a escala das mudanças nas mesmas. Isso pode ser exemplificado na média da expectativa de vida delas, que tem aumentado (DA SILVA *et al.*, 2018).

A percepção do cenário descrito levou ao desenvolvimento desse trabalho, que tem por objetivo fazer uma revisão sistemática dos estudos no Brasil que conseguiram obter, por meio do uso da automação, resultados conclusivos no tocante à eficiência energética.

## 2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Com o intuito de produzir uma revisão crítica e abrangente da literatura foi realizada uma investigação científica em que estudos relevantes sobre a questão formulada foram reunidos. Para isso, utilizou-se o banco de dados do Portal de Periódicos Capes e o *software* livre *Harzing's Publish or Perish* versão 7.19.2739.7407, como fonte e método de identificação, seleção e análise sistemática.

Para o levantamento e análise dos estudos foram realizadas quatro etapas. A primeira, realizada no mês de abril de 2020, consistiu na busca dos termos “eficiência energética” e “automação” em qualquer um dos campos, sem utilizar filtros que delimitassem o ano da publicação. Nesta etapa foram encontrados 240 resultados. Na segunda etapa foram excluídas as teses, as dissertações, os capítulos de livros, os artigos internacionais e as duplicidades, resultando em 63 artigos publicados em revistas e anais de congressos. Em seguida foi realizada a leitura dos títulos, resumos e palavras-chave dos artigos. O critério de elegibilidade foi de selecionar as pesquisas que apresentaram comprometimento com a eficiência energética fazendo uso de alguma forma de automação na metodologia. Esta etapa resultou em 14 artigos. A quarta e última etapa seguiu com a leitura completa de todos os trabalhos.

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

A produção científica relacionada ao tema é majoritariamente recente e incipiente. A aplicação dos critérios obteve um resultado de 14 publicações, sendo todas no formato de artigo de periódicos e anais de congressos e estão descritas na Tabela 1.

Título	Autores	Ano	Objetivos
<b>Melhoria da eficiência energética de refrigeradores domésticos.</b>	VENDRUSCULO e POMILIO.	2008	Apresentar resultados experimentais da eficiência energética de um refrigerador de uma porta, popular, pertencente à classe 1 estrela, utilizando um controlador de temperatura com lógica <i>Fuzzy</i> .
<b>Controle automático de registros de descarga com acionamento pneumático em unidades de armazenagem agrícola.</b>	ANDRIGHETTO; VALDIERO e SOUZA.	2008	Testar e avaliar o desempenho de um sistema de posicionamento pneumático no controle automático da abertura da gaveta de registros de descarga, contribuindo com o desenvolvimento de uma solução inovadora para a automação de instalações armazenadoras agrícolas.
<b>Automação de sistema hidráulico em edificações verticalizadas e seus reflexos na eficiência energética da instalação.</b>	DA CRUZ FILHO e QUALHARINI.	2009	Mostrar que utilizando a automação é possível eliminar o reservatório superior de acumulação de água em edifícios, minimizando o consumo de energia.
<b>Eficiência energética no controle e automação de processos industriais utilizando redes neurais artificiais.</b>	AQUINO <i>et al.</i>	2009	Aumentar a eficiência energética de sistemas industriais através do desenvolvimento e a implementação de um sistema de controle baseado em inteligência artificial.
<b>Eficiência energética em sistemas de ventilação axial utilizando redes neurais artificiais.</b>	MOREIRA <i>et al.</i>	2009	Quantificar a redução da potência ativa requerida pelo elemento acionador de um ventilador axial que opta pela operação segundo o método de redução de vazão utilizando redes neurais artificiais.

<b>Investigação de variável adequada ao controle automático de vazão sem uso de sensores em campos irrigados por meio de análise multivariada</b>	CANAFISTULA, <i>et al.</i>	2010	Investigar uma variável adequada ao pseudo controle da vazão de um sistema de irrigação que economize o uso de sensores e simplifique o sistema de controle através de análise multivariada.
<b>Uso de controlador PID como tecnologia eficiente em sistema de aquecimento de creche suína.</b>	BARROS, ROSSI e SARTOR.	2015	Avaliar a eficiência de duas tecnologias de controle de temperatura em sistema de aquecimento resistivo em creche suína, no uso de energia elétrica e no ganho de peso dos leitões.
<b>Projeto de eficiência do forno <i>Stein</i> com automação.</b>	QUINTAO e PRUDENTE.	2016	Atender as necessidades de uma empresa em relação às metas de economia de energia e adequação ao mercado atual e para isso foi estudada uma maneira de gerar economia de gás com o desligamento de pilotos de ignição e também eliminar atrasos mecânicos no processo de acendimento, purga e estanqueidade do forno de reaquecimento Stein, através do uso de recursos da automação.
<b>Eficiência energética: projeto e desenvolvimento de um novo produto o autômata.</b>	ANTONIO e BORGES.	2018	Avaliar como a aplicação de um produto inovador pode influenciar na redução do consumo de energia do aparelho de ar condicionado de uma residência localizada no município de Palmas - Tocantins.
<b>Automação residencial e eficiência energética: um estudo de caso.</b>	DE SOUZA <i>et al.</i>	2019	Mostrar a viabilidade de implantação de projetos de automação para pessoas de classe baixa.
<b>Projeto de Controle <i>Fuzzy</i> para Aprimorar a Eficiência Energética de Secadores Rotativos.</b>	PEREIRA JUNIOR, BITARAES e EUZEBIO.	2019	Reduzir o consumo de energia pela queima de biomassa em uma planta de secagem rotativa de fertilizantes através de controlador <i>Fuzzy</i> .
<b>Um Sistema de Gerenciamento e Automação de Climatização para Eficiência Energética.</b>	ROCHA <i>et al.</i>	2019	Otimizar o uso de aparelhos de ar condicionado com vistas à eficiência energética.
<b>Controle Inteligente da Pressão Hidráulica com ênfase na Eficiência Energética.</b>	DINIZ <i>et al.</i>	2019	Desenvolver uma metodologia para otimização dos setores de distribuição de água, permitindo o aumento da eficiência energética e melhorias da pressurização dos sistemas de abastecimento de água.
<b>Prototipação de uma solução para promover eficiência energética em ambientes inteligentes utilizando <i>IoT</i>.</b>	GOMES, PEREIRA e RAMOS.	2020	Desenvolver um protótipo de solução para controle energético, estabelecendo um modelo adaptativo para o recolhimento de dados sobre o consumo energético de uma residência.

Tabela 1 - Compilado dos estudos realizados no Brasil sobre eficiência energética utilizando automação, em ordem cronológica.

Fonte: elaboração própria.

As primeiras publicações encontradas são de 2008, seguidas por um aumento no ano de 2015, conforme pode ser observado na Figura 1.

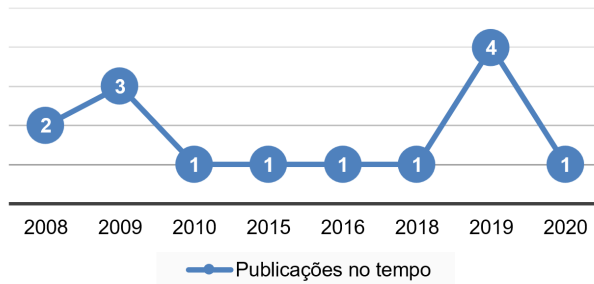


Figura 1. Quantidade de publicações por ano.

Das 14 publicações selecionadas, 64% são trabalhos relacionados a processos industriais (ANDRIGHETTO, VALDIERO e SOUZA, 2008); (DA CRUZ FILHO e QUALHARINI, 2009); (AQUINO *et al.*, 2009); (MOREIRA *et al.*, 2009); (CANAFISTULA, *et al.*, 2010); (BARROS, ROSSI e SARTOR, 2015); (QUINTAO e PRUDENTE, 2016); (PEREIRA JUNIOR, BITARAES e EUZEBIO, 2019); (DINIZ *et al.*, 2019), no qual, 21% correspondem a aplicações práticas e 43% foram verificadas em laboratórios ou ambientes de teste controlado de empresas. O restante da produção científica, 36%, traz estudos de eficiência energética em ambientes residenciais e escritórios (VENDRUSCULO e POMILIO, 2008); (ANTONIO e BORGES, 2018); (DE SOUSA *et al.*, 2019); (ROCHA *et al.*, 2019); (GOMES, PEREIRA, RAMOS, 2010), com prevalência em automação de sistemas de climatização. Esses percentuais podem ser observados na Figura 2.



Figura 2. Percentual de publicações encontradas por setor.

Dentre os casos apresentados que estão relacionados a atividades industriais, observou-se que houve uma predominância de estudos de eficiência energética em sistemas de bombeamento e hidráulica em geral (DA CRUZ FILHO e QUALHARINI, 2009); (AQUINO *et al.*, 2009); (CANAFISTULA, *et al.*, 2010); (DINIZ *et al.*, 2019).

Alguns municípios apresentam perdas importantes nos sistemas de distribuição de água, representando problemas tanto do ponto de vista hidro energético quanto do ecológico. Em sua maioria, essas perdas são oriundas de vazamentos de água por excesso de pressão nos ductos que compõe o sistema. Dessa forma, são propostas válvulas redutoras de pressão ao longo da rede de distribuição de água. Porém, este dispositivo provoca perdas de carga no sistema de bombeamento, pois os motores elétricos estarão sempre trabalhando com velocidade nominal e, portanto, será usada a máxima potência elétrica (DINIZ *et al.*, 2019).

A eficiência energética dos conjuntos moto bombas é de suma importância nos sistemas de abastecimento de água, visto que isso representa quase a totalidade dos gastos com eletricidade das concessionárias de água. Como proposta de medida de eficiência energética, podem ser utilizados inversores de frequência para controle de velocidade de rotação dos conjuntos moto bombas unido as técnicas de controle em malha fechada. Porém, pelo fato de os sistemas de abastecimento de água apresentarem características não lineares e variantes no tempo, os métodos de controles clássicos não apresentam bons resultados dinâmicos (DINIZ *et al.*, 2019).

Para sanar tal dificuldade, Diniz *et al.* (2019), foi utilizado um controlador baseado em lógica *Fuzzy* para controle da pressão hidráulica objetivando a redução no consumo de energia elétrica. Dessa forma, foi possível alcançar uma economia máxima de até 40%. Além da diminuição de perdas por vazamento, em razão do uso do controlador, manteve-se uma pressão hidráulica constante ao longo do sistema de abastecimento.

Outro estudo de eficiência energética relacionado a sistemas hidráulicos que obteve resultados significativos de redução de consumo de energia elétrica em conjunto moto bomba foi realizado na Universidade Federal de Pernambuco (AQUINO *et al.* 2009).

O laboratório de hidráulica em que foram realizados os experimentos apresenta um sistema de bombeamento inteiramente comandado eletronicamente por um sistema supervisório, que permite o controle tanto in loco quanto remotamente. Esse sistema instrui o inversor de frequência com uma curva que relaciona tempos de acionamentos, que são aplicados ao conjunto moto bomba para realizar o bombeamento. Para isso, é feita a entrada de dados no sistema supervisório através de scripts, que podem conter desde informações simples até algoritmos complexos. Assim, os autores desenvolveram um sistema de automação baseado no modelo computacional de Redes Neurais Artificiais (RNA), que foi capaz de parametrizar o inversor de frequência com base apenas no dado de volume desejado reduzindo o consumo de energia elétrica em todo o sistema de até 26% (AQUINO *et al.* 2009).



O uso da automação para obtenção de resultados relacionados a eficiência energética pode ser percebido nos mais diversos setores, como o agroindustrial. No setor de grãos, ao se fazer a abertura da gaveta de um registro de descarga, observa-se o despejamento de um fluxo de grãos em uma esteira motorizada. Esse fluxo é função direta da abertura da gaveta, e causa impacto energético no sistema de motorização da esteira, visto que um grande fluxo de carga pode fazer com que os motores trabalhem acima de sua capacidade nominal. Isso pode implicar não só em um elevado consumo de energia elétrica, como também na redução da vida útil dos motores devido ao superaquecimento, visto que a sobrecarga acarreta a circulação de corrente elétrica acima da nominal do motor (ANDRIGHETTO, VALDIERO e SOUZA, 2008).

Diante de tal cenário, Andrighetto, Valdiero e Souza (2008), realizaram um estudo de automação com acionamento pneumático no controle de abertura da gaveta de um registro de descarga no Departamento de Tecnologia da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. O experimento demonstrou a implantação de um sistema que realiza o controle automático da abertura do registro em função da corrente exigida pelo motor elétrico da correia transportadora, medida por meio de sensores como os transformadores de corrente.

Quando houvesse um fluxo excessivo, era detectada uma corrente no motor maior do que a nominal e o sistema fazia o registro de descarga ter sua abertura reduzida, causando uma diminuição do fluxo de grãos e consequente normalização da corrente, por meio da eliminação da sobrecarga. Os resultados obtidos permitiram a conclusão de que o uso de acionamentos pneumáticos com controladores ON-OFF é uma solução viável e de baixo custo para a automação dos registros de descarga nas instalações agroindustriais (ANDRIGHETTO, VALDIERO E SOUZA, 2008).

Nos estudos analisados nesta revisão a automação em ambientes residenciais e de escritório foram impulsionados pela popularização dos computadores pessoais de baixo custo, que permitem uma gama de ações nesse sentido. O barateamento das tecnologias de *Internet of Things* (IoT) associada à constante busca da humanidade por conforto e comodidade incentivou a pesquisa e desenvolvimento de automação residencial, que por sua vez implicou uma melhoria na eficiência energética nesses locais (DE SOUSA *et al.* 2019; ROCHA *et al.* 2019; GOMES, PEREIRA e RAMOS, 2010).

Ações como controle remoto de equipamentos e iluminação através de smartphones, facilidade de acompanhamento de consumo de energia elétrica com uso de softwares e controle automático de circuitos através de sensores diversos possibilitaram o uso mais eficiente da eletricidade. A realização de um estudo de caso de um *smart place* na Universidade de Vassouras – RJ é um exemplo do cenário descrito (GOMES, PEREIRA e RAMOS, 2010).

O fato de uma parcela significativa do orçamento de uma residência ser destinado ao pagamento do consumo de energia elétrica motivou este experimento. Para tal,

foi desenvolvida uma aplicação supervisória do consumo energético de diferentes componentes no ambiente estudado. O uso de ferramentas *open source* e gratuitas e o apoio existente nessas comunidades facilitou a implantação do sistema. A solução foi baseada na utilização do computador de baixo custo do tipo *Raspberry Pi* associado a linguagem de programação *Python*. Com o auxílio de sensores de corrente, foi feita a detecção de utilização de circuitos de tomadas e iluminação e a criação de um banco de dados. O controle de cada elemento pode ser feito com chaves controladoras, quando alguma medida fosse atendida de acordo com o parâmetro estabelecido. O procedimento percebeu viabilidade como medida de eficiência energética, aliada ao baixo custo de hardware e uso de softwares gratuitos (GOMES, PEREIRA e RAMOS, 2010).

## 4 | CONCLUSÕES

Através deste estudo foram identificadas poucas publicações relacionadas ao uso de automação como medida para obtenção de eficiência energética no Brasil. Sendo notável a preferência ao aumento de produtividade quando se busca realizar automação dos processos. Apesar da incipiência de estudos, são observados resultados significativos quanto à redução de consumo de energia elétrica e outros insumos.

No setor industrial, a predominância de estudos relacionados a sistemas de bombeamentos e distribuição de água pode ser explicado pelo alto consumo de energia elétrica nos conjuntos moto bomba. O uso da automação associada aos inversores de frequência para controle da velocidade de rotação desses conjuntos se apresenta como medida eficaz quando se objetiva a eficiência energética. O uso da automação em ambientes residenciais e de escritórios em geral apresentou uma predominância no controle dos sistemas de climatização, por esses representarem maior parcela no consumo de energia elétrica nesses locais.

Nesse contexto, recomenda-se a realização de outros estudos nessa temática com o propósito de derivar novos conhecimentos nessa área e elucidar as vantagens da automação para eficiência energética no cenário nacional.

## REFERÊNCIAS

- ALTOÉ, Leandra *et al.* **Políticas públicas de incentivo à eficiência energética.** Estudos Avançados, v. 31, n. 89, p. 285-297, 2017.
- ANDRIGHETTO, P. L.; VALDIERO, A. C.; DE SOUZA, M. **Controle automático de registros de descarga com acionamento pneumático em unidades de armazenagem agrícola.** Cienc. Rural, Santa Maria, v. 38, n. 9, p. 2626-2629, Dez. 2008. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782008005000017>.
- ANTONIO, B.; BORGES, M. T. **Eficiência energética: projeto e desenvolvimento de um novo produto o autômata.** XXXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Maceió, Alagoas. Out. 2018. Disponível em: [http://www.abepro.org.br/biblioteca/TN\\_STP\\_262\\_507\\_35155.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_STP_262_507_35155.pdf).

AQUINO, R. R. B.; LINS, Z. D.; ROSAS, P. A. C.; CORDEIRO, L. F. A.; RIBEIRO, J. R. C.; AMORIM, P. S.; TAVARES, I. A. **Eficiência Energética no Controle e Automação de Processos Industriais Utilizando Redes Neurais Artificiais**. Revista Eletrônica de Potência, v. 14, n. 2, 2009. <http://dx.doi.org/10.18618/REP.2009.2.117124>.

BARROS, J. S. G.; ROSSI, L. A.; SARTOR, K. **Uso de controlador PID como tecnologia eficiente em sistema de aquecimento de creche suína**. Rev. bras. eng. agric. ambient., Campina Grande, v. 19, n. 5, p. 476-480. Maio, 2015. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n5p476-480>.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional**: Relatório síntese, ano base 2018. Rio de Janeiro, 2019a.

BRASIL. Ministério de Minas Energia. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. **Plano Nacional de Eficiência Energética**: Premissas e Diretrizes Básicas. Brasília, 2011.

BRASIL. MISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético Departamento de Informações e Estudos Energéticos. **Resenha energética brasileira**, exercício de 2018. EDIÇÃO DE MAIO DE 2019. Brasília: MME, 2019b.

CANAFÍSTULA, F. J. F.; LOPES, F. B.; SOARES, R. B.; ANDRADE, E. M.; TEIXEIRA, A. DOS S. **Investigação de variável adequada ao controle automático de vazão sem uso de sensores em campos irrigados por meio de análise multivariada**. Ciência Rural, 40(11), 2317- 2323. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782010001100011>.

DA CRUZ FILHO, O. R.; QUALHARINI, E. L. **Automação de sistema hidráulico em edificações verticalizadas e seus reflexos na eficiência energética da instalação**. Exacta, v. 7, n. 2, p. 241-249, 2009. DOI: 10.5585/exacta v7i2.1446.

DA SILVA, E. B.; SCOTON, M. L. R. P. D.; PEREIRA, S. L.; DIAS, E. M.; PASSOS, P. L.; DE BARROS, O. **Automação & Sociedade**: Quarta Revolução Industrial, um olhar para o Brasil. São Paulo, Brasport, 2018.

DE SOUSA, A. R. M.; DOS SANTOS, P. R.; FONSECA, W. S.; MANITO, A. R. A.; ARAÚJO, R. C. F.; LOBATO, E. P. DE S. **Automação residencial e eficiência energética**: um estudo de caso/Residential automation and energy efficiency: a case study. Brazilian Journal of Development, v. 5, n. 8, p. 13086-13101, 2019. DOI:10.34117/bjdv5n8-124.

DINIZ, M. L.; FLORES, T. K. S.; VILLANUEVA, J. M. GOMES, H. P.; DE ANDRADE, P. H. M. **Controle Inteligente da Pressão Hidráulica com Ênfase na Eficiência Energética**. 14º Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. Ouro Preto, MG. Out. 2019. DOI: 10.17648/sbai-2019-111348.

GOMES, F. S.; PEREIRA, A. F.; RAMOS, P. V. B. **Prototipação de uma solução para promover eficiência energética em ambientes inteligentes utilizando IoT/Prototyping a solution to promote energy efficiency in smart environments using IoT**. Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 3, p. 11926-11934, 2020. DOI:10.34117/bjdv6n3-160.

LAMB, F. **Automação Industrial na Prática**. Porto Alegre: AMGH, 2015.

LIAO, Yongxin *et al.* **The impact of the fourth industrial revolution: a cross-country/region comparison**. Production, v. 28, 2018.

MOREIRA, A. B.; TEIXEIRA, V. S. C.; BRAGA, A. P. S., PONTES, R. S.T. **Eficiência energética em sistemas de ventilação axial utilizando redes neurais artificiais**. Anais do IX Congresso Brasileiro de Redes Neurais / Inteligência Computacional (IX CBRN). Ouro Preto, MG. Dez. 2009. DOI: 10.21528/CBRN2009-194.

MOREIRA, J. R. S. (org.). **Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética**. 1 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

PATTERSON, Murray G. **What is energy efficiency?** Concepts, indicators and methodological issues. Energy policy, v. 24, n. 5, p. 377-390, 1996.

PEREIRA JÚNIOR, M.; BITARÃES, S. M.; EUZÉBIO, T. A. M. P. **Projeto de Controle Fuzzy para Aprimorar a Eficiência Energética de Secadores Rotativos**. 14º Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. Ouro Preto, MG. Out. 2019. DOI: 10.17648/sbai-2019-111449.

QUINTÃO, W. A.; PRUDENTE, P. H. **Projeto de eficiência do forno stein com automação**. p. 435-442. 53rd Rolling Seminar, Rio de Janeiro, 2016. ISSN: 2594-5297, DOI 10.5151/1983-4764- 28007.

ROCHA, F.; SANTOS, L. F.; GAMELEIRA NETO, J.; FERNANDES, A.; BATISTA, T.; CAVALCANTE, E. **Um Sistema de Gerenciamento e Automação de Climatização para Eficiência Energética**. Anais do XLVI Seminário Integrado de Software e Hardware. SBC, 2019. p. 81-92. DOI: <https://doi.org/10.5753/semish.2019.6569>.

VENDRUSCULO, E. A.; POMILIO, J. A. **Melhoria da Eficiência Energética de Refrigeradores Domésticos**. Revista: Eletrônica de Potência, v. 13, n. 4, 2008. DOI: 10.18618/REP.2008.4.231239.

## PRINCIPAIS PARÂMETROS DE DESEMPENHO EMPREGADOS PELAS EMBARCAÇÕES DE PEQUENO PORTE MOVIDAS A ENERGIA FOTOVOLTAICA NO DESAFIO SOLAR BRASIL

*Data de aceite: 01/06/2021*

*Data de submissão: 03/03/2021*

**David Coverdale Rangel Velasco**

Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia Fluminense  
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro  
<http://lattes.cnpq.br/9356476964884212>

**Valter Luís Fernandes de Sales**

Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia Fluminense  
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro  
<http://lattes.cnpq.br/6366696562174157>

**RESUMO:** O Desafio Solar Brasil (DSB) é um rali de barcos, movidos a energia solar, proposto para disseminar o espírito da competitividade, aliado à busca por inovação tecnológica, sustentabilidade e a cultura da cooperação mútua. Alcançar tais objetivos é a energia que move participantes de diversas regiões do país, em especial estudantes de cursos técnicos e de engenharia, professores e colaboradores diversos que buscam incessantemente pela constituição e desenvolvimento do melhor conjunto, constituído por embarcação e equipe. Neste sentido a pesquisa visou identificar que parâmetros técnicos relativos às embarcações proporcionaram os melhores desempenhos. O método da pesquisa consistiu na análise do regulamento e dos recursos e estratégias utilizados pelas equipes vencedoras das últimas etapas. Foram identificados e sequenciados

os parâmetros prioritários a saber: telemetria; controlador de carga; motor de propulsão; bateria; casco da embarcação. Estes são, portanto, os aspectos que os que já participam ou pretendem participar devem priorizar no sentido de alcançarem os melhores resultados, em termos competitivos, para concepção e uso das embarcações no DSB.

**PALAVRAS-CHAVE:** Energia solar fotovoltaica, propulsão de embarcações de pequeno porte, desafio solar brasil.

### MAIN PERFORMANCE PARAMETERS EMPLOYED BY SMALL VESSELS MOVED TO PHOTOVOLTAIC ENERGY IN THE BRAZILIAN SOLAR CHALLENGE

**ABSTRACT:** The Challenge Solar Brazil (DSB) is a boat rally, powered by solar energy, proposed to disseminate the spirit of competitiveness, combined with the search for technological innovation, sustainability and the culture of mutual cooperation. Achieving these goals is the energy that moves participants from different regions of the country, especially students from technical and engineering courses, professors and diverse collaborators who constantly seek the constitution and development of the best group, consisting of a vessel and team. In this sense, the research aimed to identify which technical parameters related to vessels provided the best performances. The research method consisted of analyzing the regulations and the resources and strategies used by the winning teams in the last stages. Priority parameters were identified and sequenced, namely: telemetry; charge controller; propulsion engine; drums; hull of the vessel.

These are, therefore, the aspects that those who already participate or intend to participate should prioritize in order to achieve the best results, in technical terms, for the design and use of vessels in the DSB.

**KEYWORDS:** Photovoltaic solar energy, propulsion of small vessels, challenge solar brazil.

## 1 | INTRODUÇÃO

A emprego da energia solar fotovoltaica na propulsão de embarcações já é uma realidade no Brasil, vide o exemplo das embarcações de pequeno porte desenvolvidas especialmente para participar do DSB. A Figura 1 demonstra um exemplo dessas embarcações.

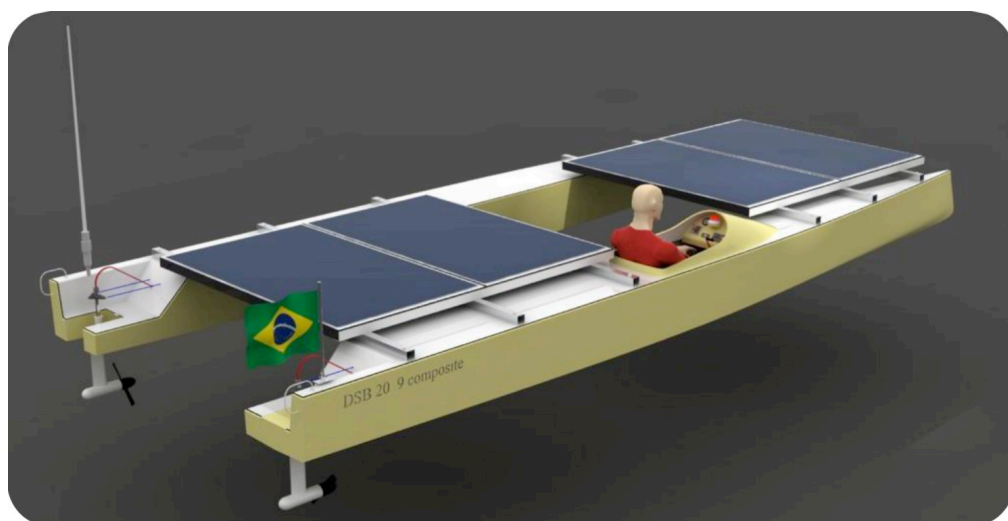


Figura 1. Ilustração de uma embarcação típica do DSB.

Fonte: Migueis 2019.

O DSB é um evento nacional inspirado numa competição holandesa chamada *Frisian Solar Challenge*, que acontece a cada dois anos no norte do país europeu. Lá, os participantes percorrem aproximadamente 220 quilômetros de canais das 11 cidades da região de Frísia (PORTALSOLAR, 2017).

Por aqui, organizada sob a forma de competições entre equipes, o DSB busca, entre outros objetivos, promover o desenvolvimento de tecnologia, formar estudantes de ciências e tecnologias no uso de fontes alternativas de energia, popularizar a cultura náutica, incentivar o uso das fontes alternativas de energias, promover o intercâmbio entre estudantes e pesquisadores de ciências e tecnologias (DSB, 2009a).

Conforme aponta Batista *et al.* (2015), as embarcações de pequeno porte movidas a energia limpa, como as do DSB, auxiliam no desenvolvimento e divulgação de tais tecnologias. Assim o presente trabalho insere-se como um possível guia para a construção de embarcações movidas a energia solar, especialmente as empregadas no DSB, vislumbrando em contribuir para que se obtenha um melhor custo benefício das embarcações e pontos onde as inovações poderiam possuir maior impacto.

## **2 | MATERIAIS E MÉTODOS**

A definição dos principais parâmetros de desempenho de um barco para o DSB iniciou-se por meio da análise do regulamento vigente, artigos publicados pelas equipes, projetos de embarcações do DSB e respectivos desempenhos até 2020, especialmente as etapas de 2018 e 2020, bem como de uma bibliografia complementar.

### **2.1 Regulamento avaliado**

O regulamento avaliado foi elaborado em 2018 e continua vigente até o presente momento. Nele, além de descritas as reponsabilidades das partes e as instruções da competição, são listados requisitos que uma equipe deve seguir para poder competir. Desta forma a viabilidade de cada elemento depende inicialmente deste regulamento, visto que por melhor que seja o barco, ele não poderá competir caso não se enquadre no regulamento. Por fim, a análise do regulamento teve o enfoque em requisitos como: delimitação das categorias, segurança, construção, sistemas elétricos (painéis solares, baterias e circuitos elétricos).

### **2.2 Artigos publicados pelas equipes participantes**

Ao participar do DSB as equipes desenvolvem suas embarcações e aperfeiçoam tecnologias existentes, criando inovações. A difusão das mesmas vai além da participação na competição. Assim, o DSB possui seu próprio congresso no qual são publicados artigos nos eixos: veículos elétricos, fontes alternativas de energia, educação em ciência, etc. Contudo, também existem diversos artigos publicados em diferentes congressos, revistas, etc. Ao analisar estes artigos é possível obter informações sobre o desenvolvimento das embarcações das equipes, bem como suas justificativas.

### **2.3 Projeto das embarcações competidoras**

Durante a DSB 2018 (Búzios/RJ) e 2020 (São Francisco do Sul/SC) os presentes autores participaram como observadores da competição, tendo acesso ao paddock e as equipes que ali estiveram. Desta forma, foi possível ver grande parte do projeto das embarcações, bem como conversar com seus respectivos projetistas acerca deles. Esta análise possibilita verificar a influência das diversas variáveis das embarcações e seus objetivos, bem como confrontá-los com os resultados obtidos na competição e as informações já publicadas em objetos clássicos de estudo, como livros e periódicos.

## 2.4 Análise da competição

Ao realizar um projeto é necessário seguir algumas premissas e não necessariamente elas se confirmam na prática. Esse fato somado à possíveis erros de projeto, gestão, estratégia, etc podem ensejar em resultados diferentes dos esperados para as embarcações durante a competição. Assim, a competição é um importante instrumento que aponta os resultados finais das embarcações. Realizar tal análise permite não só filtrar e definir os principais parâmetros de desempenho, mas também para validar que tais parâmetros realmente foram decisivos para o desempenho das equipes.

## 2.5 Análise bibliográfica complementar

De forma a fundamentar as demais análises é importante correlaciona-las com as bibliografias complementares. Isto não só aumenta a confiabilidade as informações da pesquisa, mas também permite que seja explicado de forma científica coisas que anteriormente foram constatadas por um processo experimental.

## 3 | RESULTADOS E CONCLUSÕES

Constatou-se que o principal desafio durante a competição é utilizar a energia produzida da melhor maneira possível, pois o evento é realizado ao longo de uma semana e a utilização inadequada durante um período pode não só prejudicar o desempenho durante aquele momento, mas também durante o restante da competição. Assim foram definidos cinco parâmetros principais de desempenho. Estes parâmetros influenciam direta e/ou indiretamente na eficiência da utilização de energia durante a competição e serão explicados nas subseções a seguir.

### 3.1 Casco

O casco da embarcação é de grande importância para obter um desempenho adequado e é um dos componentes mais duráveis da embarcação, visto algumas equipes utilizam cascos criados há 10 anos. O design do barco influencia na resistência ao movimento e pode ser projetado de forma a ficar mais adequado a um determinado regime de escoamento. Contudo tal elaboração é de difícil realização necessitando de cálculos complexos e/ou simulações em programas específicos como *Computational Fluid Dynamics* (CFD) e *MaxSurf*, vide o exemplo da Figura 2.



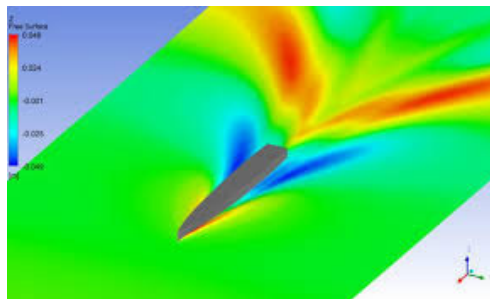


Figura 2. Análise utilizando o software *Computational Fluid Dynamics*.

Fonte: Machado (2015).

Outro fator importante é que o casco representa um grande percentual do peso da embarcação e por consequência influencia no consumo de energia. Esse fato possui uma alta influência no desempenho das embarcações, especialmente as que competem na categoria livre, nesta categoria não existe peso mínimo da embarcação. Assim, escolher elaborar o projeto da embarcação deve-se ter o cuidado para não superdimensionar a resistência do barco, bem como de utilizar métodos de fabricação e materiais que resulte no barco mais leve.

Considerando os esforços em que o casco da embarcação está submetido, bem como a resistência e densidade do material, constatou-se que é o mais leve para esta finalidade é o compósito estrutural do tipo sanduíches com núcleo em forma de colmeia, *Nomex*. Este material possui uma alta resistência específica, sendo também utilizado na indústria aeronáutica e pode reduzir o peso do casco da embarcação em mais de 70% (informação verbal)<sup>1</sup>.

### 3.2 Baterias

As baterias representam um importante componente do sistema, pois são elas que armazenam toda a energia e as diferentes tecnologias das mesmas permitem trabalhar dentro de uma curva de carga/descarga mais adequadas, além de representar um valor significativo do peso da embarcação, especialmente quando se utilizam tecnologias baseadas em chumbo.

O regulamento estabelece que a capacidade da bateria será considerada de acordo com uma curva de descarga de uma hora (C1) dada pelo fabricante, sendo a capacidade nominal total das mesmas limitada. Cada equipe pode escolher quais baterias devem ser utilizadas e associá-las, desde que permaneçam dentro dos limites de tensão e corrente estabelecidos pela competição. Os bancos de baterias são divididos em dois grupos, o sistema auxiliar, que é específico para alimentação unicamente do rádio e das bombas de porão, e sistema principal, que é para os demais equipamentos do barco (DSB, 2018a).

1. Informação fornecida pelo engenheiro naval e Yacht designer, Ronaldo F. Migueis, em junho de 2020.

A tecnologia com maior destaque na competição é a de Lítio, pois permite um melhor carregamento com um peso inferior, possuindo assim uma ótima densidade energética. Na competição europeia a utilização das baterias de lítio tem sido quase que unânime pelos motivos supracitados (MACHADO, 2015). As baterias a base de chumbo são o contrário, possuem uma menor densidade energética e são mais simples de utilizar, sendo as únicas que um sistema de monitoramento da bateria não é obrigatório.

### 3.3 Motor

A utilização de um motor adequado é fundamental para o desempenho do barco, visto que ele é o responsável pela locomoção da embarcação e é o componente que solicita a maior parte da energia do sistema. Contudo os motores elétricos de embarcações fabricados no Brasil, no que tange rendimento energético, estão defasados com os de outros países, sendo elas comumente importados (NASCIMENTO *et al.*, 2011). Observou-se durante a competição a existência de motores adaptados que inicialmente foram projetados para outras finalidades, mas sua adaptação foi uma maneira mais viável de combinar uma maior eficiência energética com menor custo.

Uma relação interessante dos motores elétricos é que conforme a velocidade aumenta o consumo sobe exponencialmente, conforme a Figura 3 que demonstra um gráfico de um dos motores mais comuns utilizados na competição em análise.

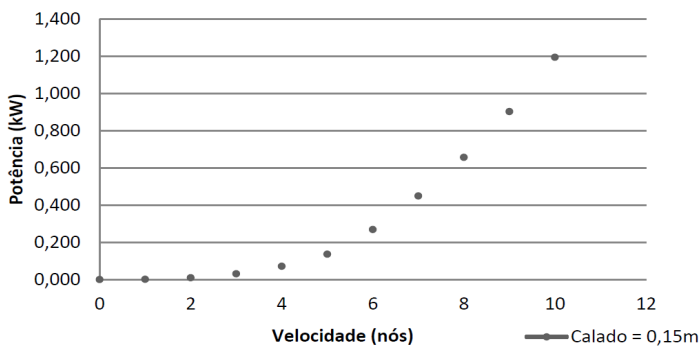


Figura 3. Potência demandada pelos propulsores versus velocidade da embarcação.

Fonte: NASCIMENTO *et al.* (2011).

Isto ocorre devido a influência desta variável no arrasto, sendo também o consumo influenciado por outras variáveis como geometria e peso da embarcação, o que reforça a importância da confecção adequada do casco da embarcação e a busca por minimizar o seu peso (ÇENGEL e CIMBALA, 2015). Araújo *et al.* (2016) apresentaram a estratégia de sua equipe em sua pesquisa, tentando utilizar-se de dois motores para reduzir o consumo

e/ou atingir potências superiores. Para tal é prudente utilizar-se de cálculos, simulações e/ou testes que verifiquem tal viabilidade e posição adequada dos motores como pode ser observado na Figura 4. Isto é necessário, pois a depender do projeto, o desempenho da embarcação pode cair e até mesmo favorecer a cavitação do motor, sendo o posicionamento do motor um fator recomendado até mesmo para equipes que utilizam apenas um motor.

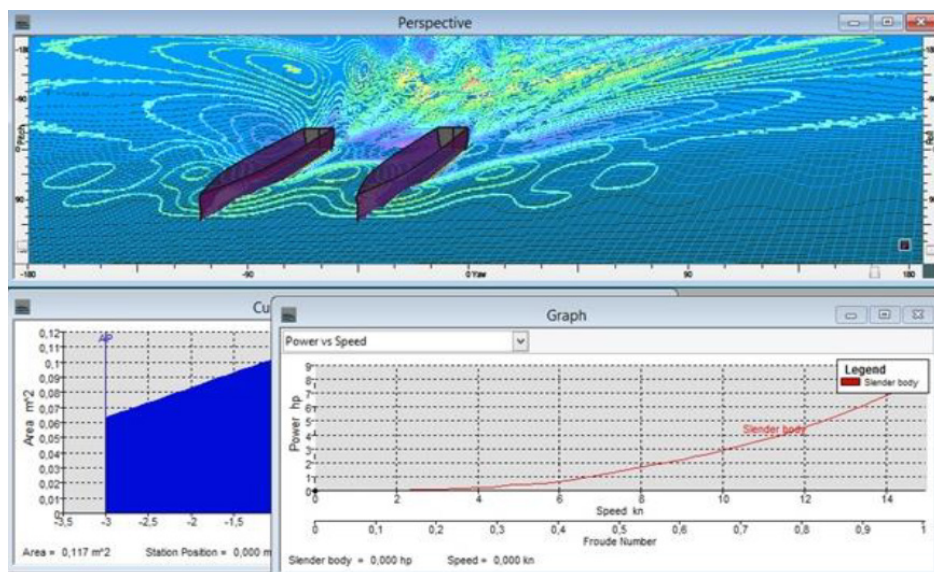


Figura 4. Testes hidrodinâmicos utilizando o *MaxSurf*.

Fonte: ARAUJO *et al.* (2016).

A estratégia de adotar dois motores não se provou tão eficaz visto que as equipes que se destacam na competição não utilizam dois motores, mas sim um único motor que normalmente é importado ou motores adaptados com eficiências superiores. Isto ocorre, pois as equipes que utilizam dois motores menos potentes geralmente possuem motores normalmente nacionais que embora sejam mais baratos, possuem eficiências inferiores. Quanto ao tipo de alimentação de corrente, Silva *et al.* (2013) observaram que os motores de corrente contínua apresentam um rendimento aproximadamente 20% inferior que os de corrente alternada e reitera que os motores de maior rendimento são comumente importados.

### 3.4 Controlador de carga

O Controlador de carga é um componente fundamental de qualquer sistema fotovoltaico, pois ele: ajusta a tensão de carga de acordo com o estado da bateria, protege o sistema e permite o monitoramento da produção de energia. No mercado existem

controladores de carga do tipo *Pulse Width Modulation* (PWM) e *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), sendo o último recomendado por possuir uma eficiência superior mesmo que seja mais caro que o primeiro. O MPPT é mais eficiente que o PWN, no qual o ganho de eficiência varia de acordo as condições de uso e fabricante sendo estimado entre 30% e 40%. Contudo, os mais conservadores acreditam que este valor é inferior e está entre 10% e 15% (PHOTON, 2008 *apud* NASCIMENTO *et al.* 2011).

Há também a possibilidade de desenvolver seu próprio um controlador de carga, visto que já existem pesquisas sobre isso e o desenvolvimento tecnológico é valorizada na competição, possuindo até um prêmio especificamente para isso, o Prêmio Fernando Amorim (DSB, 2018b; IFSC, 2015).

### 3.5 Telemetria

O DSB não é uma competição que se pode ganhar simplesmente por possuir o melhor barco. É uma competição onde diversas variáveis, conforme já mencionado, podem intervir no planejamento, dentre elas podemos acrescentar: incidência solar, condições marítimas, desempenho inesperado durante as provas ou até mesmo mudanças no cronograma da competição. Durante o 1º dia do DSB de 2009, foi observado a importância da estratégia e Filipe Manzoni, através do site oficial do DSB, disse que uma determinada equipe: “provou que mais importante que os motores e a sua potência, foi a estratégia e o uso correto da energia” (DSB, 2009b).

A possibilidade de monitorar o estado do barco é fundamental para a definição da estratégia necessária para competir, seja para saber se o barco possui energia para realizar uma prova ou para até mesmo mudar a velocidade da embarcação durante a competição, dada uma mudança repentina na incidência solar.

Embora algumas das variáveis medidas possam ser visualizadas pelo piloto, ter que monitora-las e definir a melhor estratégia para cada momento é muito difícil. Assim muitas equipes deixam o piloto encarregado de somente visualizar as variáveis mais simples como a velocidade enquanto outros membros da equipe ficam encarregados definir a melhor estratégia transmitindo somente o que o piloto deve fazer para conseguir um desempenho superior. É importante ressaltar que não possuir a telemetria não impossibilita a equipe de fazer uma estratégia adequada, mas dificulta, especialmente na adaptação durante a competição.

A tecnologias para realizar a transmissão de dados durante o DSB são diversas, sendo destaque para as que são independentes de internet móvel. O DSB não é sempre realizado nos mesmos locais, assim ao desenvolver um sistema que seja dependente de infraestrutura de terceiros não é garantia de sucesso. No geral utilizam-se de microcontroladores que operam numa relação entre frequência e comprimento de onda satisfatórios. Isto é, que resulta numa combinação de qualidade de transferência e alcance satisfatórios à equipe.

### 3.6 Considerações Finais

Os parâmetros aqui apresentados são decorrentes de avaliações sobre a competição no estado atual, especialmente nas etapas analisadas. Assim, condições climáticas diferentes das competições avaliadas, alterações no regulamento, desenvolvimento de novas tecnologias, entre outras possíveis mudanças podem alterar a importância dos parâmetros aqui apresentados, bem como dar uma importância superior aos parâmetros que atualmente não prioritários.

### REFERÊNCIAS

ARAUJO, C. P. M. *et al.* **Construção de uma embarcação solar para competição universitária.** XLIV congresso brasileiro de educação em engenharia, Rio Grande do Norte, Brasil, 2016.

BATISTA, F. A. B. *et al.* **Embarcação solar de pequeno porte como objeto de pesquisa para o desenvolvimento e divulgação do uso de tecnologias associadas a energias limpas.** Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, v. 4, p. 411–430, 2015.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações.** 3. ed. AMGH, Porto Alegre, Brasil, 990 p., 2015.

DESAFIO SOLAR BRASIL. **O Desafio.** Desafio Solar Brasil, 2009a. Disponível em: <<https://desafiosolar.wordpress.com/odesafio/>>. Acesso em: 27 fev. 2019.

DESAFIO SOLAR BRASIL. **1º dia de competição: tempo encoberto faz com que equipes mudem estratégia.** Desafio Solar Brasil, 2009b. Disponível em: <<https://desafiosolar.wordpress.com/2009/10/20/primeiro-dia-de-competicao-tempo-encoberto-faz-da-estrategia-a-arma-mais-eficiente/>>. Acesso em: 28 fev. 2019.

DESAFIO SOLAR BRASIL. **Regras de competição.** Rio de Janeiro, DSB, 2018a. Disponível em: <<https://desafiosolar.wordpress.com/odesafio/regras>>. Acesso em: 27 fev. 2019.

DESAFIO SOLAR BRASIL. **Resultado Final do DSB 2018.** DSB, 2018b. Disponível em: <<https://desafiosolar.wordpress.com/2018/09/18/resultado-final-do-dsb-2018/>>. Acesso em: 28 fev. 2019.

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA. **EDITAL 06 - 2015/PROPPI: Resultado final (reitoria).** Santa Catarina, Brasil, IFSC, 2015. Disponível em: <[https://caco.ifsc.edu.br/arquivos/pesquisa/coord\\_pesq/editais2015/Edital%2006/resultado\\_gp\\_final\\_2015\\_reitoria.pdf](https://caco.ifsc.edu.br/arquivos/pesquisa/coord_pesq/editais2015/Edital%2006/resultado_gp_final_2015_reitoria.pdf)>. Acesso em: 28 fev. 2019.

MACHADO, A. S. **Construção de embarcação solar de alto desempenho para competição.** Projeto de Graduação em Engenharia Naval e Oceânica - Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 42 p., 2015.

MACHADO, O. J. *et al.* **Mudança na regra das baterias.** Desafio Solar Brasil, 2015. Disponível em: <<https://desafiosolar.org/2015/09/18/mudanca-na-regra-de-bateria/>>. Acesso em: 03 jun. 2020.

MIGUEIS, R. F. **Arquivo Pessoal**, 2019.

NASCIMENTO, L. R. *et al.* **Barco solar: embarcação elétrica alimentada por energia solar fotovoltaica.** Revista Brasileira de Energia Solar, v. II, p. 41-48, 2011.

PORTAL SOLAR. **Desafio Solar: conheça o campeonato de barcos movidos à energia solar Portal Solar - Tudo sobre Energia Solar Fotovoltaica**, 2017. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/>>. Acesso em: 27 fev. 2019.

SILVA, G. G. DA *et al.* **Desenvolvimento do barco solar do IFSC.** Revista Ilha Digital, v. 4, p. 91-96, 2013.

## VIABILIDADE ECONÔMICA DA ENERGIA FOTOVOLTAICA RESIDENCIAL

Data de aceite: 01/06/2021

Data de submissão: 01/03/2021

### **David Coverdale Rangel Velasco**

Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia Fluminense  
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro  
<http://lattes.cnpq.br/9356476964884212>

### **Elivandro Tavares Lôbo**

Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia Fluminense  
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro  
<http://lattes.cnpq.br/3664388491683265>

### **Welder Azevedo Santos**

Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia Fluminense  
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro  
<http://lattes.cnpq.br/8847175700677292>

### **Wagner Vianna Bretas**

Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia Fluminense  
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro  
<http://lattes.cnpq.br/0842599717842402>

### **Rodrigo Martins Fernandes**

Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia Fluminense  
Campos dos Goytacazes - Rio de Janeiro  
<http://lattes.cnpq.br/9013009708304943>

**RESUMO:** A utilização da radiação solar como fonte de energia já é uma realidade no Brasil e no mundo. Seja como fonte de energia térmica

ou fotovoltaica sua utilização vem crescendo, mesmo que necessite de altos investimentos iniciais. Este trabalho avalia a viabilidade da utilização de módulos fotovoltaicos em residências, considerando seus custos de manutenção, substituição, aquisição e a economia fornecida. A simulação considerou um consumidor residencial padrão localizado no estado do Rio de Janeiro, sendo a faixa estudada de 250 a 750 kWh. A análise de investimento lançou mão dos seguintes métodos: Taxa Interna de Retorno (TIR) anual, Valor Presente Líquido (VPL) específico e PayBack (PB) Descontado, sendo adotada uma taxa de desconto de 10,25% ao ano. Foram produzidos três gráficos que demonstram a variação destes indicadores em função do consumo mensal. Observou-se que a viabilidade de investimento aumenta conforme o consumo, especialmente para valores acima de 580 kWh. A partir deste valor todos os indicadores financeiros possuem menor taxa de variação em função do consumo. O motivo deste comportamento é que não há mais mudança nas alíquotas de impostos e a tendência redução da variação do custo do kWp do sistema.

**PALAVRAS-CHAVE:** Análise de investimento, energia solar, sistemas fotovoltaicos.

### ECONOMIC VIABILITY OF RESIDENTIAL PHOTOVOLTAIC ENERGY

**ABSTRACT:** The use of solar radiation as an energy source is already a reality in Brazil and worldwide. Whether as a source of thermal or photovoltaic energy, its use has been growing, even though it requires high initial investments. This work evaluates the feasibility of using

photovoltaic modules in homes, considering their maintenance, replacement, acquisition costs and the savings provided. The simulation considered a standard residential consumer located in the state of Rio de Janeiro, the range being studied from 250 to 750 kWh. The investment analysis used the following methods: Annual Internal Rate of Return (IRR), specific Net Present Value (NPV) and PayBack (PB) Discounted, adopting a discount rate of 10.25% per year. Three graphs were produced showing the variation of these indicators according to monthly consumption. It was observed that the investment viability increases according to consumption, especially for values above 580 kWh. From this value on, all financial indicators have a lower rate of change depending on consumption. The reason for this behavior is that there is no more change in the taxes rates and the tendency to reduce the variation in the system's kWp cost.

**KEYWORDS:** Investment analysis, solar energy, photovoltaic systems.

## 1 | INTRODUÇÃO

Seja energia muscular ou cinética, desde os tempos mais antigos a energia já era utilizada. Contudo, o surgimento e evolução da indústria, bem como o crescimento da população resultaram numa maior demanda energética global. As máquinas que substituíam grande parte dos esforços humanos, agora necessitavam de grandes quantidades de energia e em alguns países, como a Alemanha, em outrora estavam com sua matriz energética associada especialmente associadas a madeira. Contudo novas fontes de energias foram surgindo e ganhando o espaço ocupado pela anterior por motivos econômicos e ambientais (CARVALHO, 2014).

Em meados do século XIX, Becquerel, A. E. descobriu o efeito fotovoltaico (FV), que somado à outras pesquisas, permitiu a criação das células FV no final XIX, contudo ainda inviável economicamente. Embora o petróleo e gás natural, sejam poluentes e não renováveis, eles podem ser facilmente transportados enquanto possuem uma grande densidade energética e baixo custo. Esse fato proporciona uma vantagem em relação a energia solar, contudo a energia FV vem se tornando cada vez mais competitiva (CARVALHO, 2014; CRESEB/CEPEL, 2004).

Ademais, o potencial de geração de energia aumenta conforme se aproxima da linha do equador, onde recebe 150% mais de energia quando comparado a regiões ao ponto de máxima latitudes elevadas (COMETTA, 2004). Desta forma países, como o Brasil, que estão próximo a linha do equador recebem grandes quantidades de radiação solar, o que facilita a geração de mais energia com menores custos e área demandada, sendo o seu desafio controlar o calor que é reduz a quantidade de energia produzida.

O Brasil possui como principal fonte de produção de energia hidrelétrica sendo complementada por usinas termoeletricas. Desta forma, na ausência de chuvas e/ou crescimento da demanda de energia se aciona um número maior de termoeletricas, o que resulta num aumento de custo de energia e emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE),



como o Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). A construção de novas hidroelétricas é afetada por questões ambientais e sociais, sendo assim necessário analisar outros meios de produzir energia (ROSA, 2007).

O Brasil possui um grande potencial de geração de energia FV, mas isso não significa que qualquer aplicação é vantajosa. Existem valores mínimos de energia a serem pagos, variação da alíquota de imposto de acordo com a quantidade de energia consumida, influência das condições de geração de energia (bandeira tarifária), entre outros fatores que influenciam na viabilidade do investimento. Este trabalho visa analisar a viabilidade da produção de energia fotovoltaica em residências, bem como a influência do consumo mensal na mesma.

## 2 | MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho teve inspiração a pesquisa de Ferreira *et al.* (2013). Nela foi desenvolvida uma planilha que permitia estimar custos de acordo com valores informados por uma empresa. Contudo, a finalidade deste trabalho é diferente.

A metodologia deste trabalho consiste em utilizar de projetos reais, realizados segundo semestre de 2019, para estimar o custo de projeto, permitindo assim construir gráficos de viabilidade econômica por meio de planilhas eletrônicas. Assim, foram criados gráficos que demonstram a variação de três dos principais métodos matemáticos de análise de investimentos em função do consumo de uma residência, são eles: Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e PayBack (PB) Descontado.

### 2.1 Cenário simulado

O procedimento para acesso a micro e minigeração são descritos no Módulo 3 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), assim como os formulários necessários para tal. Suas etapas e respectivos prazos são apresentados na Figura 1, onde as etapas de responsabilidade do consumidor estão em azul e as da distribuidora em vermelho. Dentre os prazos, a emissão do parecer de acesso se destaca como variável, pois pode dobrar quando o sistema de distribuição necessitar de obras de melhorias ou reforço (ANEEL, 2017).

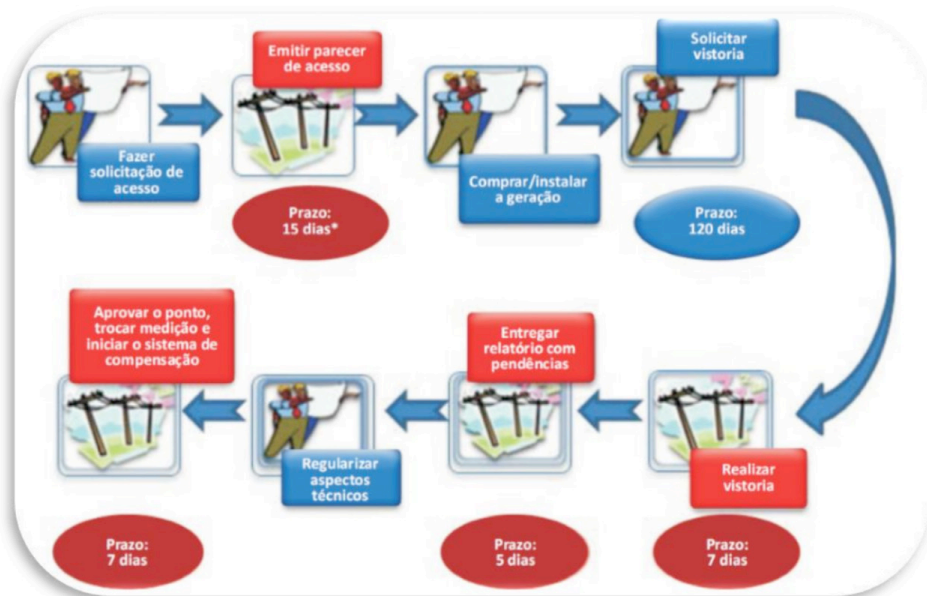


Figura 1. Etapas e prazos do procedimento de acesso.

Fonte: ANEEL (2016).

De forma conservadora, foi considerado neste trabalho que o tempo entre o pagamento do serviço e sua finalização é de dois meses. Após estes dois meses, foi simulado um período de 15 anos, com decaimento anual de 0,8% na eficiência dos módulos, máximo segundo a garantia do fabricante, num cenário sem a necessidade de substituição de equipamentos, um dos utilizados por Dantas e Pompermayer (2018), resultando assim num fluxo de caixa convencional. Considerou-se também um custo de 1% do valor do sistema solar com manutenção e operação estimado por Nakabayashi (2015).

A produção de energia efetiva de um módulo é dependente da incidência solar que assim como tarifas cobradas variam de acordo com o ambiente. Desta forma, ao realizar o estudo foi necessário realizar um recorte geográfico, sendo neste trabalho estudada a região norte fluminense do estado do Rio de Janeiro sob concessão da distribuidora de energia ENEL.

A tarifa básica, sem impostos, da ENEL para o grupo B1, residencial normal, é de R\$ 0,68367/kWh na bandeira verde, R\$ 0,69710/kWh na bandeira amarela, R\$ 0,72536/kWh vermelha patamar 1 e R\$ 0,74610/kWh no patamar 2; sendo necessário acrescentar o valor dos impostos (ANEEL, 2020). Neste trabalho, considerou-se como tarifa básica uma média ponderada do valor das atuais tarifas básicas para cada bandeira possuindo como peso a quantidade de meses que cada uma ficou vigente desde de a concepção do modelo atual (fevereiro de 2016) a junho de 2020.

Os impostos incidentes sobre a tarifa são: Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), Programa de Integração Social (PIS) e Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (COFINS). O ICMS é um imposto estadual que para o consumidor residencial, no estado do Rio de Janeiro, varia de 0% a 32% de acordo com o consumo, conforme a Tabela 1. Já o PIS e COFINS são impostos federais que não podem ser previstos com antecedência ou vinculados ao valor de uma variável. Assim, estimou-se neste trabalho o valor do PIS e COFINS como a média dos valores praticados ao longo de 2019.

Faixa	Alíquota
0 a 50 KWh	0%
51 a 299 kWh	18%
300 a 450 kWh	31%
450kwh ou superior	32%

Tabela 1. Alíquotas de ICMS do estado do Rio de Janeiro incidentes sobre a energia elétrica.

Fonte: Rio de Janeiro (1996, 2002, 2017).

O América do Sol é um programa do Instituto para o Desenvolvimento de Energias Alternativas na América Latina (IDEAL) em parceria com a Cooperação Alemã para o desenvolvimento sustentável (AMERICA DO SOL, 2020). Dentro das diversas ferramentas disponíveis neste programa, está um simulador de Solar que, dentre outras informações, fornece a quantidade de energia produzida por Wp dos módulos solares ao longo do ano de acordo com a localização informada. Esse valor é válido para módulos de silício policristalino, voltadas para o norte com inclinação correspondente a latitude da região solicitada. Assim, como o módulo simulado é deste material e as demais premissas do programa estão em conformidade com os objetivos deste trabalho, serão utilizados tais dados (1,353 kWh/Wp). Assim constituem-se parte dos cenários do trabalho que os módulos estarão com a inclinação correspondente a latitude e orientação ao norte.

Segundo ANEEL (2015), existe uma taxa mínima de disponibilidade do sistema elétrico a ser paga pelo consumidor de acordo o sistema (monofásico, bifásico e trifásico). Como esse valor não pode ser deduzido pela energia produzida ele influencia no cálculo da viabilidade. Neste trabalho simulou-se considerando um sistema bifásico, pois o valor da taxa mínima é intermediário (50kWh).

Por fim, o consumo e a produção de energia não são constantes ao longo do ano, sendo possível estimar o consumo baseado num histórico pessoal e a produção de energia histórico da região. Contudo, de forma a simplificar está análise os cálculos foram realizados com baseado no montante anual considerando que não haveria produção excedente.

## 2.2 Valor Presente Líquido (VPL)

O VPL representa o somatório dos fluxos de caixas descontados de uma determinada taxa, no instante inicial. Isto é; soma-se os valores de entrada e saída divididos pela taxa que deve ser elevada a quantidade de períodos que está distante. Seu valor indica o quanto que o investimento remunera a mais ou a menos que a taxa remuneraria em um valor presente. A Figura 2 representa uma relação entre o valor presente investido e o valor futuro do mesmo (SOUZA e CLEMENTE, 2008).

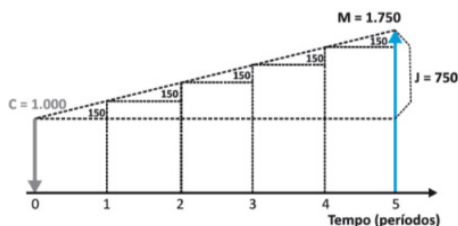


Figura 2. Representação do valor futuro (M) necessário para remunerar um capital (C) investido cinco períodos antes dado um juro (J). Fonte: PUCCINI (2011).

Neste trabalho, é necessário comparar diferentes valores de VPL e investimento. Para tal foi utilizado uma razão entre VPL e o valor investido, denominada aqui como VPL específico.

## 2.3 Taxa Interna de Retorno (TIR)

TIR representa qual a taxa de desconto que tornaria o VPL de um investimento nulo. Seu cálculo manual é realizado por métodos numéricos e normalmente utilizam-se de calculadoras financeiras ou planilhas eletrônicas, para determinar o seu valor de maneira mais fácil (PUCCINI, 2011). O número máximo de raízes de uma função é a quantidade de vezes que ela muda de sinal. Assim, em projetos com fluxo de caixa não convencionais, quando há mais de uma mudança de sinal, é possível identificar mais de uma TIR e tal fato dá uma superioridade teórica do VPL (GITMAN, 2010).

## 2.4 PayBack (PB)

O tempo de retorno de um investimento é denominado como PB. Seu valor é de extrema importância, visto que se o investimento demorar muito para obter retorno haverá mais riscos potenciais provindos de mudanças de cenário atuais não previstas (SOUZA e CLEMENTE, 2008).

O PB originalmente é determinado como o tempo em que a soma dos fluxos de caixa que resulta em zero. Contudo esse método não leva em conta o valor do dinheiro no tempo, e para esta finalidade foi criado o PB descontado. Isto é; o período em que a soma dos valores dos fluxos de caixa, descontados por uma taxa, resulta em zero (KASSAI *et al.*, 2000).

## 2.5 Taxa de Desconto

A taxa de desconto utilizada para calcular o VPL e PB Descontado, bem como para comparar com a TIR e deve ser superior à um rendimento seguro tão quanto for arriscado um investimento. Neste trabalho o fluxo de caixa estimado por um período de 15 anos e um investimento seguro com vencimento semelhante é o tesouro IPCA+ 2035. O tesouro IPCA+ 2035 possui um rendimento bruto de 4,02% superior ao Índice de Preços ao Consumidor (IPCA), ao ano, garantido caso o título seja mantido até o vencimento em 2035, isto é, por um período de 15 anos (TESOURO NACIONAL, 2020).

O rendimento líquido do tesouro IPCA+ 2035, caso o título seja mantido até o vencimento, é de 85% da soma do IPCA + 4,02% ao ano. Considerando, conservadoramente, que o aumento da tarifa de energia seja de ao menos 85% do IPCA o retorno líquido real do investimento é de aproximadamente 3,42%. Para determinar a taxa de desconto deve-se adicionado um fator que remunere os riscos envolvidos, dentre os quais destaca-se o de mudança da legislação vigente, como a cogitada este ano. Assim, adotou-se como taxa de desconto três vezes o retorno real líquido do tesouro IPCA+ 2035, aproximadamente 10,25%.

## 2.6 Planilha eletrônica

Afim de executar todos os cálculos necessários e criar gráficos de forma automatizada, utilizou-se de uma programação em Visual Basic for Applications (VBA) juntamente com as funções do Microsoft Excel, sendo a Figura 3 um diagrama de blocos que apresenta as etapas que são necessárias para calcular os indicadores financeiros.

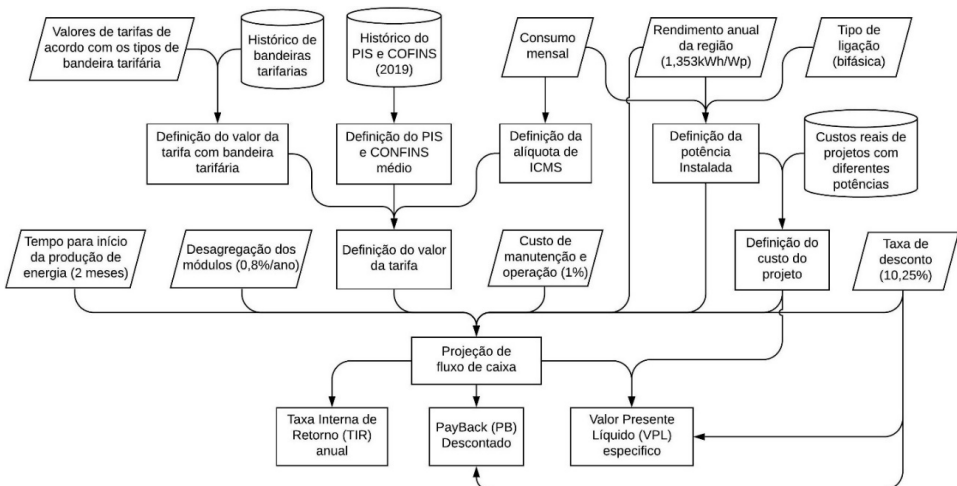


Figura 3. Diagrama de blocos do cálculo de indicadores financeiros.

Fonte: Autores (2020).

O Excel já possui funções próprias que calculam o VPL e TIR, assim como recursos para realizar quase todos os procedimentos supracitados e a criar os gráficos dos indicadores financeiros, sendo necessário somente digitar formulas e fornecer os dados adequados. A programação em VBA veio a complementar as funções já presentes no Excel de uma forma mais cômoda, sendo utilizada tanto para criar uma função que calcular o PB Descontado, quanto para automatizar a variação consumo mensal e o preenchimento de células com os valores dos indicadores a serem plotados nos gráficos.

A potência de instalação ( $P_i$ ), segundo as premissas deste trabalho, pode ser calculada conforme a Equação 1, sendo o valor da taxa mínima ( $t_m$ ), o rendimento anual ( $R_a$ ) e o consumo mensal ( $C_m$ ), um valor que foi variado entre 250 e 750 kWh pelo algoritmo de forma a gerar os resultados deste trabalho. Foi escolhida esta faixa, pois ao contactar as empresas não havia projetos para residências com consumos inferiores a 250kWh/mês e acima de 750 kWh/mês a viabilidade não se altera muito.

$$P_i = \frac{(C_m - t_m) \cdot 12}{R_a} \quad (1)$$

Já a definição do custo de projeto é dada por meio de uma interpolação linear do valor da potência instalada numa matriz com os custos de projetos fornecido por empresas da região estudada. Como mencionado anteriormente, o valor da tarifa base ( $T_b$ ) foi calculado conforme a média ponderada valor das atuais bandeiras, faltando ainda a inclusão dos impostos. Segundo a ANEL (2016), o valor final da tarifa ( $T_F$ ) pode ser definido pela Equação 2, que acrescenta o valor dos impostos estaduais (ICMS), neste trabalho conforme mostrado anteriormente na tabela 1, e dos impostos federais (PIS e COFINS), neste trabalho uma média do que foi cobrado em 2019.

$$T_F = \frac{T_b}{1 - (\text{ICMS} + \text{PIS} + \text{COFINS})} \quad (2)$$

A projeção do fluxo de caixa é iniciada-se por considerar o valor inicial como o custo de projeto ( $C_p$ ) adicionado uma correção pelos dois meses que antecedem a geração de energia, sendo o valor da correção a taxa de desconto (10,25%). O valor economizado ( $V_E$ ) nos anos subsequentes podem ser calculados por meio da Equação 3, sendo referente ao ano analisado, neste estudo de 1 a 15,  $t_d$  a taxa de desagregação dos módulos e  $C_{OM}$  os custos de operação e manutenção.

$$V_E = T_F \cdot R_i \cdot R_a \cdot (1 - t_d)^{n-1} - C_{OM} \cdot C_P \quad (3)$$

O PB Descontado foi calculado por meio de uma função apresentada na Figura 4, sendo os argumentos desta função  $TD$ , que corresponde a célula que tiver com o valor da taxa de desconto, e  $FC$ , que corresponde as células na quais estão os valores do fluxo de

caixa devendo ser selecionado uma coluna com quantas linhas forem o número de fluxo de entrada e saída. Nestas células, o primeiro valor apresenta o custo de aquisição e deve ser negativo por este motivo, os demais valores são o montante economizado nos anos, devendo ser preenchido do primeiro ano ao décimo quinto ano conforme os valores obtidos por meio da Equação 3.

```
Function PBDesc(TD As Range, FC As Range)
Dim Total As Double
Total = 0
PBDesc = 0
For C = 2 To FC.Count
If Total < -FC.Item(1) Then
Total = Total + (FC.Item(C) / ((1 + TD) ^ (C - 1)))
PBDesc = PBDesc + 1
If Total > -FC.Item(1) Then
PBDesc = PBDesc - (Total + FC.Item(1)) / (FC.Item(C) / ((1 + TD) ^ (C - 1)))
End If
End If
Next C
If Total < -FC.Item(1) Then
PBDesc = "Não há"
End If
End Function
```

Figura 4. Variação do VPL em função do consumo.

### 3 | RESULTADOS E CONCLUSÕES

Conforme a metodologia proposta, este trabalho gerou três gráficos que apontam a variação do TIR anual, VPL específico e PB Descontado em função da energia consumida, respectivamente as Figuras 5, 6 e 7. Como esperado, observou-se que a viabilidade do projeto aumentava conforme o consumo da residência era maior, podendo isto ser observado por meio de todos os indicadores financeiros utilizados neste trabalho. Os principais fatores que influenciaram tal fato foram: redução dos custos de aquisição e a variação da alíquota de ICMS. Contudo, foi possível observar também a tendência de uma estabilização próxima a demanda de 580 kWh/mês. Isto ocorre, pois a alíquota de ICMS não aumenta a partir de 450kWh e o custo do Wp do projeto tende a se diminuir menos com o aumento da potência instalada.

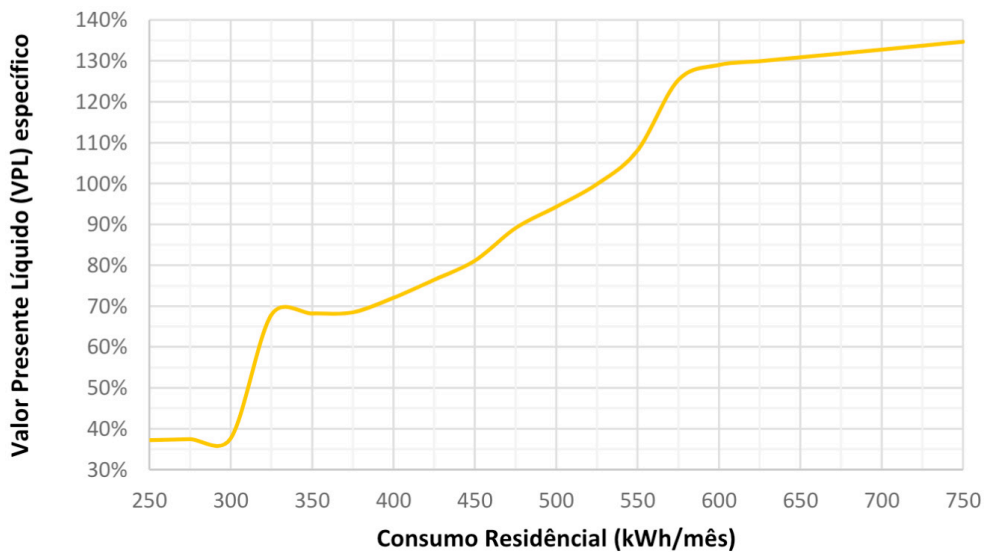


Figura 5. Variação do VPL em função do consumo.

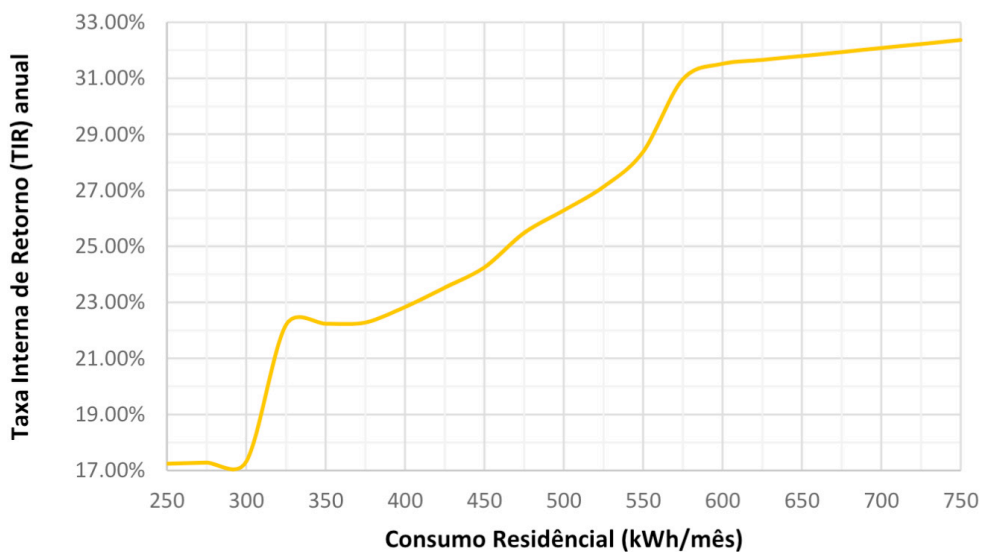


Figura 6. Variação do TIR em função do consumo.



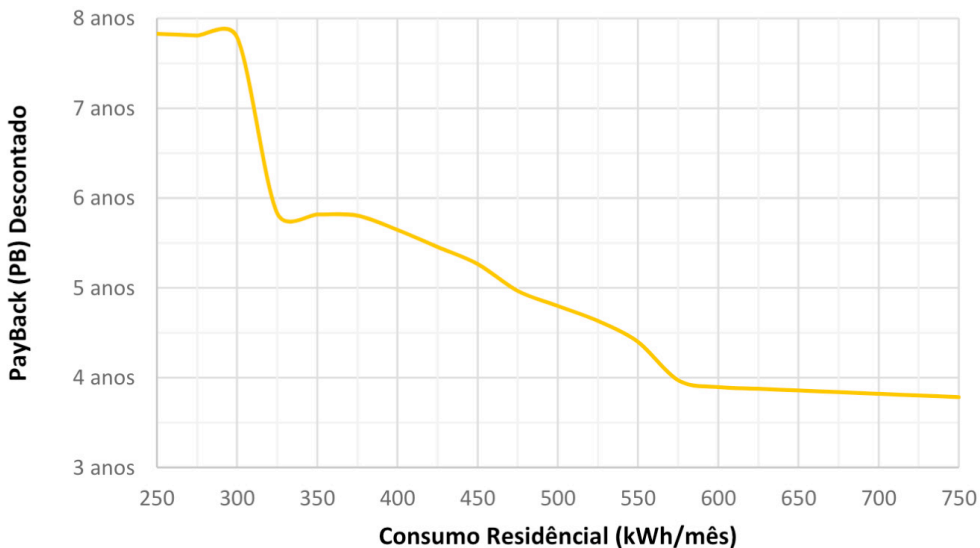


Figura 7. Variação do PB Descontado em função do consumo.

Destaca-se que para todos os cenários observados o VPL específico foi positivo, o que aponta uma viabilidade de investimento até mesmo para os que consomem menos, sendo possível observar um retorno que fica entre pouco mais de 37% e 135% de acordo com a quantidade de energia consumida. Foi possível observar também uma semelhança entre o formato da curva da TIR e do VPL específico, sendo o motivo para tal a relação entre os métodos, a TIR é a taxa para qual o VPL é nulo.

O valor da TIR anual teve taxas de variação mais significantes até o valor de 580kWh/mês. A partir deste o crescimento diminuir, pelos motivos supracitados. O valor da TIR anual foi calculado num fluxo de caixa convencional, significando assim que os valores apresentados nos gráficos são únicos. Seu valor variou entre 17,2 e 32,4% de acordo com o consumo. Quando se compara estes valores da TIR com a taxa de desconto adotada (10,25%) percebe-se uma viabilidade que pode ser mais do que três vezes superior que a mesma, o que corresponde a nove vezes o retorno em aplicações no tesouro com mesma liquidez.

Já o PB Descontado variou de 7,8 a 3,8 anos, representando assim um investimento que demora um prazo relativamente longo para ter seu retorno efetuado, estando sujeito a mudanças de cenários não previstas. Contudo, considerando que o a taxa de desconto utilizada foi de três vezes um retorno real num investimento seguro, seria difícil observar uma mudança tão abrupta que inviabilize a implantação de sistemas fotovoltaicos para a faixa estudada.

Por meio dos indicadores aqui apresentados, a utilização do micro e minigeração distribuída se mostra como uma alternativa de investimento, especialmente no cenário

econômico atual em que a Selic está em seu menor nível histórico, 2,25% ao ano<sup>1</sup>, e não se sabe os efeitos da pandemia na renda variável. Destaca-se também que existe uma possível viabilidade em sistemas de menor potência do que o limite inferior estudado neste trabalho.

Vale destacar que os resultados aqui apresentados não têm a função de substituir estudos para específicos para determinar a viabilidade de projetos, mas sim indicar o quão viável pode ser a implantação de sistemas fotovoltaicos em residências. Esses estudos podem considerar variáveis como a sazonalidade de consumo e produção, bem como características de construção do telhado, como orientação, inclinação e tipo de cobertura, o que tende a dar maior precisão nos resultados para projetos específicos.

## REFERÊNCIAS

AMERICA DO SOL. **Sobre o Simulador Solar**. Disponível em: <<http://americadosol.org/sobre-o-simulador-solar/>>. Acesso em: 17 jun. 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Micro e minigeração distribuída: sistema de compensação de energia elétrica**. 2. ed. Brasília, ANEEL, 31 p., 2016.

\_\_\_\_\_. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 3 - Acesso ao Sistema de Distribuição**. Brasília, ANEEL, 2017.

\_\_\_\_\_. **Resolução homologatória Nº 2.666**. Brasília, ANEEL, 2020.

\_\_\_\_\_. **Resolução normativa Nº 687**. Brasília: ANEEL, 2015.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Copom reduz a taxa Selic para 2,25% a.a.** Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/detalhenoticia/17095/nota>>. Acesso em: 17 jun. 2020.

DE CARVALHO, J. F. **Energia e sociedade**. Estudos Avançados, v. 28, n. 82, p. 25-31, 2014.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, Brasil, CRESESB/CEPEL, Brasil, 206 p., 2004.

COMETTA, E. **Energia Solar: Utilização e Empregos Práticos**. 5. ed. HEMUS, Brasil, 127 p., 2004.

DANTAS, S. G.; POMPERMAYER, M. F. **Viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos no Brasil e possíveis efeitos no setor elétrico**. IPEA, Brasil, 2018.

FERREIRA, R. D. A. *et al.* **Planilha para a estimação técnica e financeira de um sistema fotovoltaico**. Revista Ciências do Ambiente On-Line, v. 9, n. 2, 2013.

---

1. Reduzida unanimemente para este valor na 231ª reunião, o Comitê de Política Monetária (Copom) no dia 17 de junho de 2020 (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2020).

GITMAN, L. J. **Princípios de administração financeira**. 12. ed. Pearson, São Paulo, Brasil, 775 p., 2010.

KASSAI, J. R. *et al.* **Retorno de Investimento: abordagem matemática e contábil do lucro empresarial**. 2. ed. Atlas, São Paulo, Brasil, 280 p., 2000.

NAKABAYASHI, R. **Microgeração fotovoltaica no Brasil: Viabilidade econômica. Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos**. Instituto de Energia e Ambiente/USP, São Paulo, Brasil, 58 p., 2015.

PUCCINI, E. C. **Matemática financeira e análise de investimentos**. 2. ed. Departamento de Ciências da Administração/UFSC, Florianópolis, CAPES, Brasília, UAB, 204 p., 2011.

RIO DE JANEIRO. **Lei estadual 2.657, dispõe sobre o imposto sobre circulação de mercadorias e serviços e dá outras providências**. Assembleia Legislativa do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 1996.

\_\_\_\_\_. **Lei estadual 4.056, autoriza o poder executivo a instituir no exercício de 2003, o fundo estadual de combate à pobreza e às desigualdades sociais**. Assembleia Legislativa do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.

\_\_\_\_\_. **Lei estadual 7.786, dispõe sobre o imposto sobre a transmissão causa mortis e doação de quaisquer bens ou direitos (ITD), de competência do estado do rio de janeiro**. Assembleia Legislativa do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2017.

ROSA, L. P. **Geração hidrelétrica, termelétrica e nuclear**. Estudos Avançados, v. 21, n. 59, p. 39-58, 2007.

SOUZA, A.; CLEMENTE, A. **Decisões financeiras e análise de investimentos**. 6. ed. Atlas, São Paulo, Brasil, 200 p., 2008.

TESOURO NACIONAL. **Preços e taxas dos títulos IPCA, Pré e Pós-fixados I Tesouro Direto**. Disponível em: <<https://www.tesourodireto.com.br/titulos/precos-e-taxas.htm>>. Acesso em: 18 jun. 2020.

## SINTONIA DE CONTROLADORES DE TEMPERATURA COM REDES NEURAIS

*Data de aceite: 01/06/2021*

**Tiago Luís Andrade Pereira**

Faculdade SATC// Departamento de  
Automação Industrial

<http://lattes.cnpq.br/9724159965294521>

**Anderson Daleffe**

Faculdade SATC/ Departamento de Eng.  
Mecatrônica

<http://lattes.cnpq.br/7569701338186684>

**RESUMO:** O método de sintonia de controladores de temperatura é um processo árduo, que se remete à procura do sinal ideal no menor espaço de tempo, para que a máquina tenha economia de energia e performance adequada. Porém, com a mudança de região, estado ou país do qual a mesma foi projetada, pode gerar uma perda de rendimento ou instabilidade no processo. Com isso, surge a necessidade de que as empresas façam um retrabalho para uma nova sintonia do controlador. Esse trabalho tem como objetivo demonstrar a aplicação de uma rede neural para promover alterações dos valores do ganho proporcional e integral, sendo que esses valores são parâmetros internos de um controlador implementado em um Raspberry Pi, permitindo que a rede neural atue independente, das variações de temperatura ou ação do clima. Os testes foram realizados com um protótipo de secador em faixas de temperatura de 0 a 40 °C se mostrando eficaz, trazendo a curva de sinal ideal para o sistema. O trabalho em questão contribuiu

para uma melhora na eficiência de controladores de temperatura, visto que é reduzido o retrabalho de parametrização e tão logo, produzindo uma performance para o protótipo, constatando-se que as diferenças climáticas fazem toda diferença no processo de controle, seja ele em temperaturas baixas ou altas. Assim como no aperfeiçoamento da inteligência artificial, onde o compartilhamento de informação traga novas ideias para o controle de processos ajudando a economia energética para um mundo sustentável.

**PALAVRAS-CHAVES:** Inteligência Artificial, Redes Neurais, Keras, Controle, PID.

**ABSTRACT:** The method of tuning temperature controllers is an arduous process, which refers to the search for the ideal signal in the shortest time so that the machine has energy savings and adequate performance. However, with the change of region, state, or country from which it was projected, it can generate a loss of energy or instability in the process. With this, there is a need for companies to rework for a new tuning of the controller. This work aims to demonstrate the application of a neural network to promote changes in the proportional and integral gain values, and these values are internal parameters of a controller implemented in a Raspberry Pi, allowing the neural network to act independently, from variations of temperature or climate action. The tests were carried out with a dryer prototype in temperature ranges from 0 to 40 °C, proving to be effective, bringing the ideal signal curve to the system. The work in question contributed to an improvement in the efficiency of temperature controllers, since the parameterization rework is

reduced and, as soon as, producing a performance for the prototype, verifying that the climatic differences make all the difference in the control process, either it at low or high temperatures. As well as in the improvement of artificial intelligence, where the sharing of information brings new ideas for the control of processes helping the energy saving for a sustainable world.

**KEYWORDS:** Artificial Intelligence, Neural Networks, Keras, Control, PID.

## 1 | INTRODUÇÃO

O controle de processo acompanha as atualizações de tecnologia, tornando a fábrica física em um sistema virtual, em que são realizados testes antes da produção do produto. Protótipos são criados para simular eventos, gerar resultados, reduzir erros e aperfeiçoar o profissional.

Neste trabalho foi utilizado um protótipo de secador de grãos aquecido por meio de resistência elétrica, a fim de simular as condições de trabalho e, através de sensores, gerar uma atualização dos parâmetros internos de controle (PI), originando-se de um sistema de topologia, e baseando em redes neurais ou ANN'S (*Artificial Neural Networks*) implementando-se, um controlador PI que utiliza redes neurais para a parametrização.

A análise de controle de temperatura de uma planta industrial, por exemplo, tem função de manter uma linearidade do sistema, variando a potência da resistência elétrica que aquece o túnel de ar para que se mantenha um aquecimento constante. Através dessa temperatura pré-estabelecida como desejável (*Setpoint*), esse degrau que se almeja atingir, deve-se ajustar aos parâmetros de controle para que o sistema se torne estável. Contudo, esses valores do PID (*Proportional Integral Derivative*), será ajustado conforme o processo em que a máquina é projetada, mas os valores desses parâmetros em uma forma “modelo ideal” é abstrato, tornando a tentativa e erro, uma demonstração da melhor saída para um ajuste fino na engenharia e no reconhecimento do processo (LJUNG, 2001).

Como justificativa desse controlador, é usado como exemplo, o armazenamento de grãos em silos, em que a temperatura costuma oscilar de acordo com as condições e períodos do dia. Nesse intervalo, a máquina poderá sofrer interferências, para tanto é necessário o devido reajuste no valor do PI, mantendo assim o processo estável e garantindo a qualidade do produto armazenado.

## 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Redes neurais

Em se tratando de redes neurais, de acordo com Haykin (2004), o cérebro humano processa informações altamente complexas, havendo a possibilidade de armazenamento de dados em neurônios para tomar decisões e percepções mais rápidas que um computador. Nesse sentido, a rede neural vem de um modelo de aprendizado do ser humano, resultante

do processo de tentativa e erro ou pelas conexões conhecidas como pesos sinápticos. Esses pesos são atualizados para manter o conhecimento adquirido, sendo que também podem sofrer mutações, modificando assim a sua topologia, tão logo, formando um novo algoritmo de aprendizado.

A parte da unidade de processamento consiste em um diagrama de blocos de um neurônio conforme a Fig. 1. Nesse conjunto existem três elementos fundamentais (HAYKIN, 2004), tais como: sinapses/pesos aleatórios gerados pelo neurônio na entrada; somador/ combinador linear para equilibrar as funções; e função de ativação/ para o sinal de saída não tender ao infinito.

- Sinapses/pesos aleatórios gerados pelo neurônio na entrada;
- Somador/combinador linear para equilibrar as funções;
- Função de ativação/ para o sinal de saída não tender ao infinito.

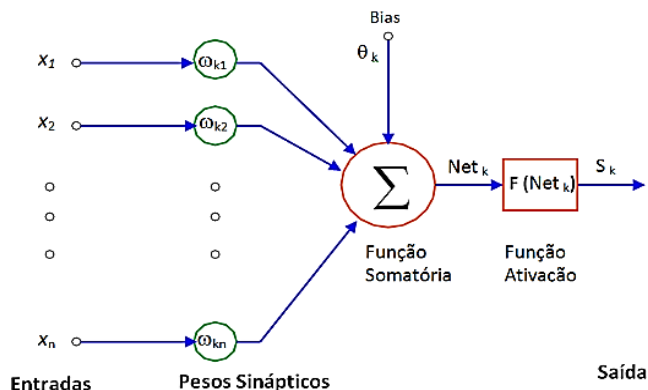


Figura 1 - Modelo de um neurônio Perceptron.

Fonte: Adaptado de Haykin (2004, p.36)

Sobre o processo de controle de temperatura, em alguns modelos de plantas industriais são inerentemente complexos, não-lineares e incertos. Essas mudanças de padrões a serem seguidos, não podem passar dos limites já pré-estabelecidos do processo de um sistema adaptativo. Conforme foi treinado, a rede neural apresentada manda os melhores parâmetros para o controlador, independentemente que a saída esteja no padrão ideal. E, ambos os controladores, adaptativos ou supervisionados, realizam testes para constatar se a função que foi utilizada está no padrão a ser alcançado (AZEVEDO; BRASIL; OLIVEIRA, 2000).

Referente a rede neural do Keras, de acordo com Ribeiro e Guimarães (2016), podemos definir Keras como uma biblioteca para rede neural de alto nível na linguagem

*python*, e que pode ser utilizada em CPU quanto em GPU. Essa aplicação funciona como coletor de dados de entrada em Tensorflow. O usuário pode variar o tipo de rede neural por outro exemplo de rede dentro da mesma biblioteca. A funcionalidade dessa biblioteca é a velocidade de processamento em matrizes predefinidas em *numpy*, quanto a definição do caminho a ser escolhido pela rede neural convulucional e redes recorrentes. Com esse otimizador interno de amostragem, o Keras determina seus parâmetros de saída em uma biblioteca própria em microssegundos, dependendo da matriz em exemplo.

Para gerar linearidade em sistema de controle, conforme dispõe Souza *et al.* (2014), ocorrem através de verificações da medida de saída do sistema. Essas medições fazem a troca de dados com a entrada e, desta forma, faz a atualização corrigindo o valor de atuação do sistema, tornando o processo um ciclo contínuo.

## 2.2 Método de controle de Ziegler Nichols

De acordo com Garcia (2018), o procedimento utilizado entre variados autores, e que serve de base para novos métodos de sintonia de P, PI e PID, é o método de Ziegler Nichols. Essa função matemática foi desenvolvida por JG Ziegler e NB Nichols em 1942, mas continua a ser um importante método de parametrização.

Segundo Bolton (1995), entre os variados tipos de sintonia que podem ser empregados para ajustar os ganhos do controlador, cada método utiliza-se de um modelo de parâmetros que são retirados do sistema. Com o método Ziegler Nichols se extrai as variáveis da Fig. 2 para sintonizar o controlador onde:

P = Sinal de teste % (degrau)

L = Tempo morto

T = Ponto de inflexão da curva

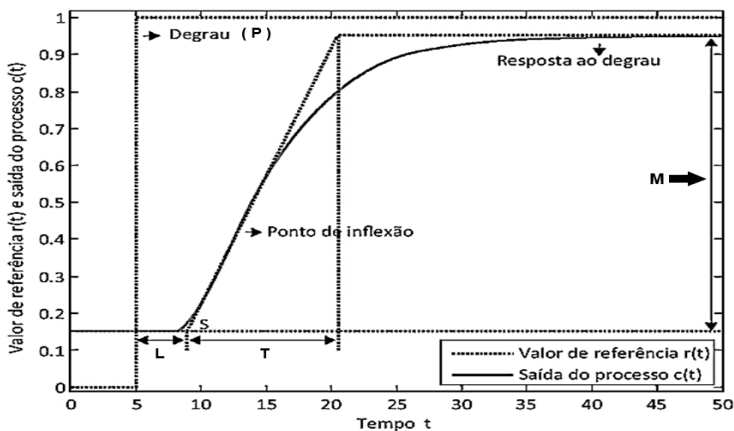


Figura 2 - Parâmetros de sintonia para o método da Curva de Reação do Processo.

Fonte: Adaptado de Garcia (2018, p.422).

Conforme Bolton (1995), utiliza - se a Eq. 1 onde intercepta o gradiente máximo, se retirar R e todas as variáveis se aplica a Tab.1 dependendo modelo de controlador P, PI e PID para realizar o ajuste fino do sistema.

$$R = \frac{M}{T}$$

Eq.  
(1)

Onde:  
R = Gradiente máximo.  
M = Sinal medido %  
T = Tempo do gradiente máximo.

MODO DE CONTROLE	Kp	Ki	Kd
Proporcional	P/RL	0	0
Proporcional + Integrativo	0,9P/RL	1/3,33L	0
Proporcional + Integrativo + Derivativo	1,2P/RL	1/2L	0,5L

Tabela 1: Função de Ziegler Nichols, para controladores.  
Fonte: Bolton (1995, p.360)

Onde:  
Kp = Ganho proporcional  
Ki = Ganho integral  
Kp = Ganho derivativo

3 I MATERIAIS E MÉTODOS

Para comprovação de um modelo de sintonizador que utiliza redes neurais, foi realizado um protótipo de secador apresentado na Fig. 3, para simular o evento do sistema de uma planta industrial.





Figura 3 - Protótipo de um secador.

Fonte: Do autor (2019)

Utilizou-se de um Raspberry Pi3 apresentado na Fig. 4, que desempenhou a função de controlador do sistema em questão. Outro componente utilizado foi o sensor de temperatura (DS18B20) que desempenhou a função de realimentação da planta. O atuador do processo que realizou o chaveamento de potência elétrica, foi um relé de estado sólido com *zero-cross*, variando a potência da resistência interna do secador.

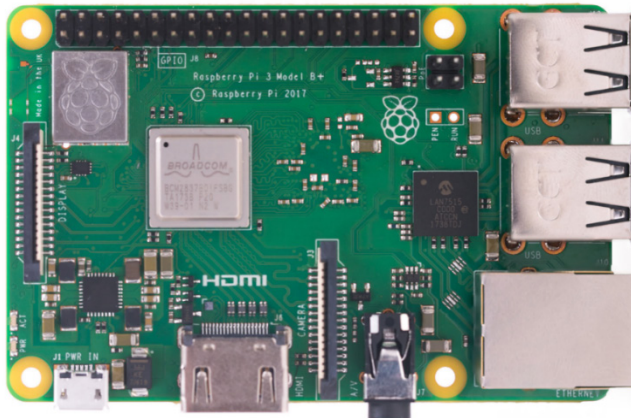


Figura 4: Raspberry Pi 3B+.

Fonte: Monk (2016).

### 3.1 Análise de controle

Com a análise e aplicação do método de Ziegler Nichols, foram retirados três modelos de gráficos, com variações de temperaturas externas entre 0 e 40°C. Para os primeiros testes realizados, foi condicionado dentro de uma câmara frigorífica com temperatura ajustada para 1 °C, por um controlador externo para que esse evento simulasse um dia de

temperatura baixa. Os demais testes realizados foram em seqüências, sendo: uma de 25 °C para temperaturas médias, e 40 °C para temperaturas altas. O teste realizado visa retirar os sobressinais e subssinais, que traga maior eficiência em um menor espaço de tempo.

### 3.1.1 Temperaturas baixas, médias e altas

Foram realizados dez testes para se obter a média da curva de temperatura do protótipo. A mesma quantidade foi aplicada para as três temperaturas.

O sinal de teste (degrau) foi de 60% da potência do sistema, com uma temperatura inicial de 1,56 °C. No decorrer do tempo de 1.200 segundos foi retirado o gráfico apresentado na Fig. 5, com uma temperatura final de 43,56 °C com o sistema já estabilizado. A frequência utilizada foi de 6,25Hz. O resultado foi de um período total de 160ms, onde 96ms foi atuado no sistema, e durante 64ms o mesmo permaneceu desligado. Durante o período em que o controlador ficou acionado, totalizou 6 ciclos completos da senoide.

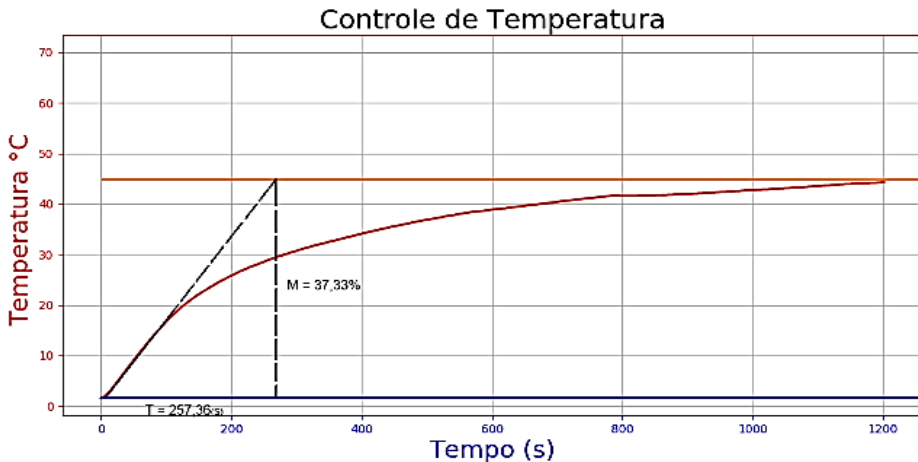


Figura 5 - Rampa de Aquecimento de 1,56 a 43,56 °C.

Fonte: Do autor (2019)

$$Kp = \frac{0,9 \cdot 60}{\frac{37,33}{257,36} \cdot 13} = 28,63 \quad Ki = \frac{1}{3,33 \cdot 13} = 0,023 \quad (1)$$

No teste para temperatura média de 25 °C, o sinal de teste (degrau) também foi de 60% da potência do sistema, com uma temperatura inicial de 25,86 °C. No decorrer do tempo de 1200 segundos, foi obtido o gráfico apresentado na Fig. 6 com uma temperatura final de 69,32 °C e com o sistema já estabilizado

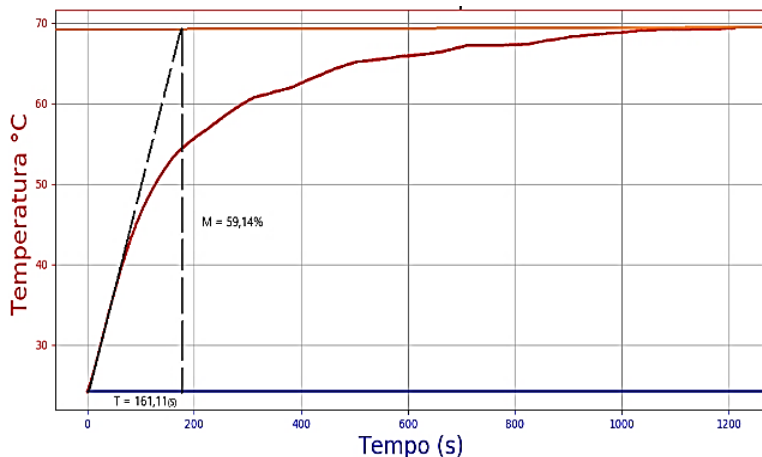


Figura 6 - Rampa de Aquecimento de 25,86 a 69,32 °C.

Fonte: Do autor (2019)

$$Kp = \frac{0,9 \cdot 60}{\frac{59,14}{161,11} \cdot 7} = 21,01 \quad Ki = \frac{1}{3,33 \cdot 7} = 0,043 \quad (2)$$

O teste realizado em temperaturas altas, de 40 °C, novamente foi feita a média dos teste realizados, no qual o sinal de teste (degrau) também foi de 60% da potência do sistema com uma temperatura inicial de 40,1 °C. No decorrer do tempo de 1200 segundos foi obtido o gráfico da Fig.7 com uma temperatura final de 74,27 °C e com o sistema já estabilizado, para poder aplicar o método em questão.

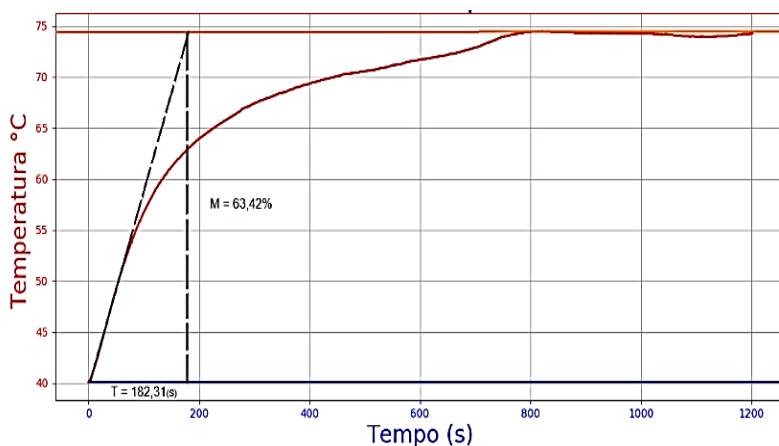


Figura 7 - Rampa de Aquecimento de 40,1 a 74,27 °C.

Fonte: Do autor (2019)

$$Kp = \frac{0,9 \cdot 60}{\frac{63,42}{182,31} \cdot 5} = 31,04 \quad Ki = \frac{1}{3,33 \cdot 5} = 0,06 \quad (3)$$

## 3.2 Matrizes de aprendizado

Para o aprendizado da rede neural, foram desenvolvidas matrizes com os valores obtidos anteriormente modificando as variações dos ganhos de Kp e Ki. As matrizes da Fig.8 formam o modelo ideal da rede neural para variadas faixas de temperatura.

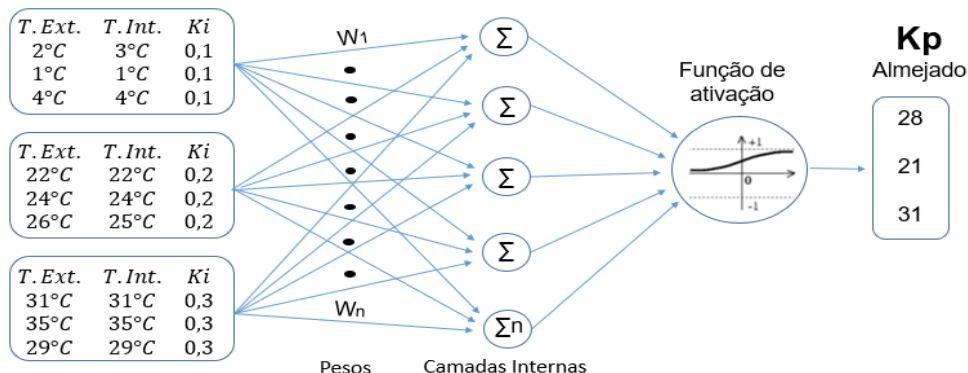


Figura 8 - Modelo de Rede neural.

Fonte: Do Autor (2019).

## 3.3 Fluxograma do controlador e programação

Para melhor entendimento do modelo de controlador com redes neurais, foi apresentado um fluxograma conforme Fig. 9. Na figura mostra cada parte do modelo ideal para execução do método, tanto quanto do controlador PI quanto da rede neural.

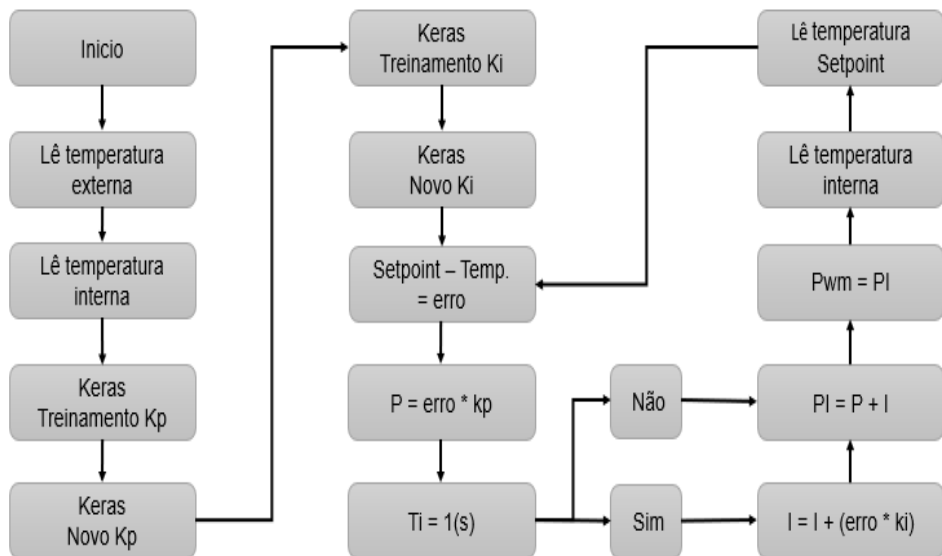


Figura 9: Fluxograma do controlador.

Fonte: Do Autor (2019).

Para retirada de dados do controlador é necessária a importação de algumas bibliotecas apresentado na Fig. 10. Essas bibliotecas são necessárias para a utilização em gráficos, Tensorflow, Keras, temporizadores, registradores do sensor, tela, entre outros, com finalidade de gerar a interface entre o usuário e o controlador.

```

#Tela
import tkinter as tk
import time
import RPi.GPIO as gpio
import threading
#Grafico
import matplotlib.pyplot as plt
#Sensor
import os
import glob
#Tensorflow/Keras
import tensorflow
import keras
import numpy as np
from keras.models import Sequential
from keras.layers import Dense, Dropout
from keras.callbacks import History
  
```

Figura 10: Importação de Bibliotecas.

Fonte: Do autor (2019)

### 3.3.1 Modelo de rede neural

A programação de uma rede neural necessita de várias linhas de código em linguagens de baixo nível (C, Java, C++, Assembly), porém em *python* em poucas linhas é possível produzir o modelo desejado, podendo treinar a rede com até quinhentas épocas em trinta segundos ou menos, a depender do dado de entrada.

A linha de programação utilizada é um dos modelos mais otimizados para obter velocidade de processamento. Na matriz de entrada são inseridos os dados como temperatura externa, temperatura interna e o ganho integral. Na matriz resultante são inseridos os possíveis resultados para o ganho proporcional, sendo que quanto maior for o conjunto de matrizes maior será a precisão do aprendizado da rede neural. A Fig. 11 mostra as entradas e saídas da rede neural.

```
x = np.array([[KI1,EXT1,INT1],[KI2,EXT2, INT2],[KI3, EXT3, INT3],#MATRIZ DE ENTRADA  
             [KI4, EXT4, INT4], [KI5, EXT5, INT5]])  
y = np.array([[KP1], [KP2], [KP3], [KP4], [KP5]])#MATRIZ RESULTANTE
```

Figura 11 - Rede Neural.

Fonte: Do autor (2019).

### 3.3.2 Dados da rede

Importando um modelo de biblioteca sequencial do keras, representado na Fig. 20, deve-se sobrepor as camadas da rede densamente conectadas com as camadas internas conforme a Fig. 12. Nessa rede foi utilizada três entradas com nove neurônios internos e apenas uma saída criando características de um neurônio *perceptron*. Através da função de compilação é dado alguns parâmetros como otimizadores “*sdg*”, *Stochastic gradient descent*, para reajuste dos pesos sinápticos. É necessário também uma função para calcular o erro da rede neural que é denominada “*mse*”, *mean squared error*, o quanto a rede se perdeu em relação a época anterior. E o método “*acc*”, *accuracy*, necessário para calcular a precisão da rede neural.

```
model = Sequential()  
model.add(Dense(9, input_dim=3))  
model.add(Dense(1))  
model.compile(optimizer='sgd', loss='mse', metrics=['acc'])
```

Figura 12 - Criação da rede.

Fonte: Do autor (2019).

### 3.3.3 Treinamento da rede

Para treinar a rede conforme a Fig. 13 é passada as matrizes através de um número de épocas predefinidas nesse trabalho foi utilizado quinhentas épocas, com a rede neural já treinada deve ser inseridos os dados de temperatura do ambiente externo, temperatura interna e o ganho integral. Esses valores são transformados em uma matriz e essa matriz resultante é inserida no modelo de rede que já foi treinado, logo resultando em um novo valor para  $K_p$ . Após todo esse processo que levou aproximadamente trinta segundos. Em seguida a essa etapa é gerado uma nova rede para retirar o valor de  $K_i$ .

```
model.fit(x, y, callbacks=[history], epochs=epoca)
w =(sensor_interno/100)
v =(sensor_externo/100)
z =ki
lista = float(w), float(v),float(z)
th = np.asmatrix(lista)
result = model.predict(th)
losss = history.history ['loss']
kp = result*100
kp= kp[0][0]
```

Figura 13 - Treinamento da rede.

Fonte: Do autor (2019).

## 3.4 Análise dos valores para PID que foram realizados nas temperaturas baixas, médias e altas

Foram realizados os testes no controlador, e quanto ao resultado em faixas de temperaturas baixas conforme apresentado na Fig. 14, com a temperatura inicial de 2,25 °C, a rede neural conseguiu gerar uma resposta para  $K_p$  e  $K_i$ . Tornando o sistema estável e sua curva característica sem sobressinal ou subssinal, mostrando o comportamento ideal para esse tipo de temperatura. Em 1400 s, o controlador utilizou 100% do atuador para alcançar o setpoint.

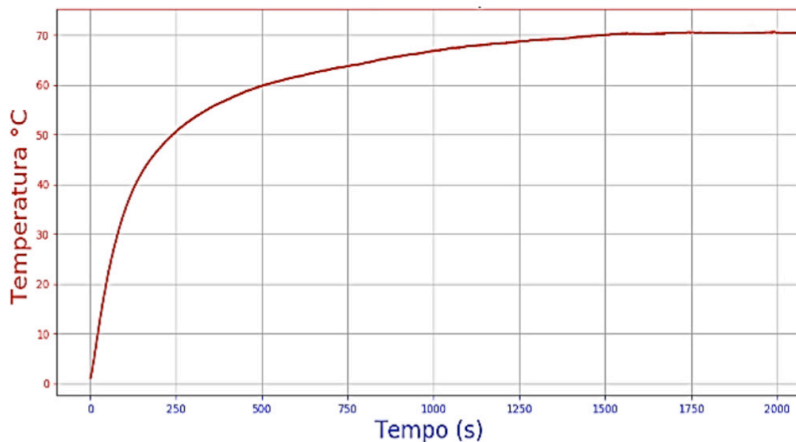


Figura 14 - Resposta do processo com Keras.

Fonte: Do autor (2019)

Quanto ao resultado em faixas de temperaturas médias, conforme analisado na Fig.15, a rede neural teve um erro de 0,0051% na temperatura externa de 26,44 °C. O modelo soube identificar a diferença de temperatura para fazer o reajuste do valor de  $K_p = 21,63$ .

```
Epoch 499/500
J9/9 [=====] - 0s 756us/step - loss: 0.0051
Epoch 500/500
J9/9 [=====] - 0s 574us/step - loss: 0.0051

Using TensorFlow backend.
TEMPERATURA DA FABRICA: 26.44 °C
IA-KP 21.63
```

Figura 15 - Rede neural gerando  $K_p$

Fonte: Do autor (2019)

Concluído o processo de aprendizado da rede  $K_p$  é novamente gerado outro modelo de rede neural conforme a Fig. 16, com novas matrizes para poder gerar um novo valor para  $K_i$  conforme os dados armazenados, onde o erro dessa rede foi de 0,00087%, sendo que o valor que a rede neural gerou de  $K_i = 0,21$ .



```
9/9 [=====] - 0s 703us/step - loss: 8.7380e-04  
0.21288517  
IA-KI 0.21
```

Figura 16 - Rede treinada gerando Ki

Fonte: Do autor (2019)

Conforme a Fig. 17, o processo para uma temperatura ambiente de 26,44 °C, se tornou estável com os valores gerados pela rede neural, sem sobressinal ou sub sinal, alcançando o Setpoint em 240 s, e depois se manteve estável. Nesse tempo, o controlador utilizou 62% do atuador.

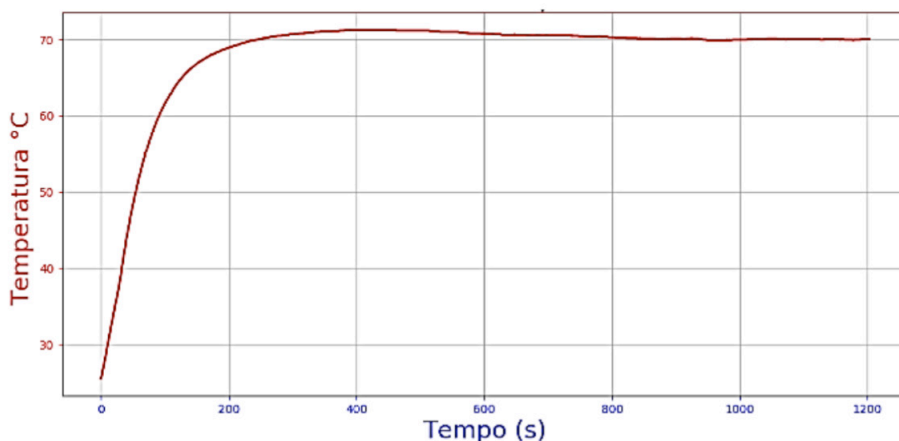


Figura 17 - Resposta do processo com temperatura de 26 °C

Fonte: Do autor (2019)

Referente ao resultado em faixas de temperaturas altas, de 39 °C, foram realizados novos valores para Kp e Ki. Nessas condições o controlador alcançou a faixa necessária para deixar o processo estável conforme a Fig. 18, idealizando que, independentemente da faixa de temperatura, os valores dos ganhos Kp e Ki foram trocados no controlador, mantendo o processo estável. Em 230 s, o controlador utilizou 53% do atuador para alcançar a temperatura almejada.

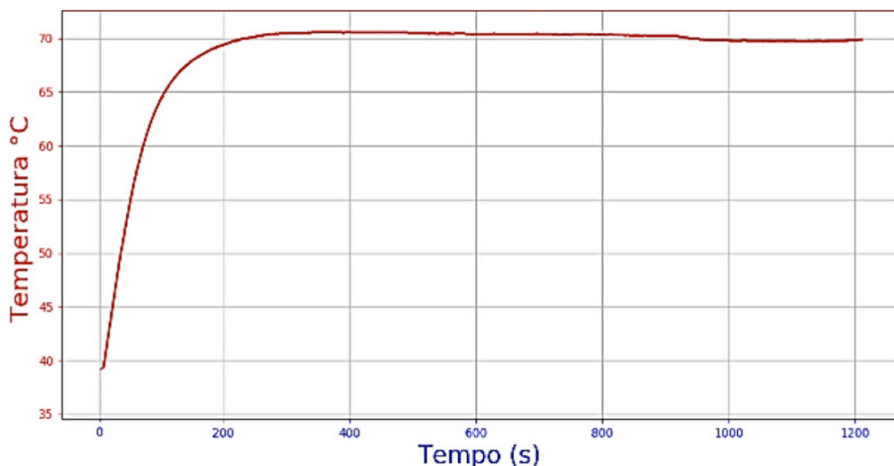


Figura 18 - Resposta do processo com temperatura de 39 °C

Fonte: Do autor (2019)

## 4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse trabalho foi apresentado um método de sintonia de controladores de temperaturas através de redes neurais, para controle conforme as mudanças climáticas de cada região. Utilizou-se o método de Ziegler Nichols como princípio teórico.

Foram realizados testes para uma temperatura ambiente de 0°C no qual o processo se manteve estável, precisando de toda potência da resistência elétrica por mais de mil e quatrocentos segundos devido a carga térmica externa do secador, e em temperaturas médias de 24°C o controlador manteve uma potência de 60%. Também foram realizados com temperatura alta de 40°C, no qual o processo necessitou apenas de 50% de sua potência e seu tempo morto diminuiu mostrando que para cada temperatura externa existem ajustes específicos de parâmetros do controlador.

A principal vantagem desse modelo de controlador de temperatura, é de não precisar reprogramar o sistema quando é enviado para uma outra região com um clima diferente, ou até mesmo evitar um distúrbio no processo. Os avanços tecnológicos trazem um modelo único, no qual o usuário apenas adicionará a temperatura desejada e o controle fará todo o resto, não se preocupando com o clima ou perda de rendimento.

Dessa maneira foi apresentado uma rede neural de fácil aplicação e de processamento a uma velocidade de microssegundos, trazendo respostas rápidas para um controlador. Os avanços tecnológicos vêm trazendo a teoria de controle para uma modelo único. Onde o usuário apenas adicionará a temperatura desejada e o controle fará todo o resto não se preocupando com o clima ou perda de rendimento.

Para dar continuidade ao projeto propõe-se a implementação de uma realimentação da rede em outros secadores, resfriadores, aquecedores e fornos industriais para o aperfeiçoamento da inteligência artificial, onde o compartilhamento de informação traga novas ideias para o controle de processos ajudando a economia energética para um mundo sustentável.

Foi disponibilizado ainda o Código aberto para que outras pessoas possam utilizar e melhorar o controlador no site: <https://github.com/tiagoguarapari/Controlador-de-temperatura>.

## REFERÊNCIAS

AZEVEDO, Fernando Mendes de.; BRASIL, Lourdes Mattos.; OLIVEIRA, Roberto Célio Limão de. **Redes neurais com aplicações em controle e em sistemas especialistas**. Florianópolis: Visual Books, 2000. 401p. ISBN 8575020056

BOLTON, Willian. **Engenharia de controle**. London: Makron Books do Brasil, 1995. 497 p. Tradução de: Valceres Vieira Rocha e Silva.

GARCIA, Cláudio. **Controle de processos industriais: estratégias convencionais**. São Paulo: Blucher, 2018. 600 p.

HAYKIN, Simon. **Redes Neurais: Princípios e Práticas**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004. 900 p. Tradução de: Paulo Martins Engel.

LJUNG, L. "Black-box models from input-output measurements", **Proc. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf.**, Budapest, pp. 138- 146.2) 2001.

MONK, Simon. **Raspberry Pi cookbook**. 2. ed. Sebastopol, CA: O'Reilly, 2016. xiv, 493 p. ISBN 9781491939109.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2009. 809 p. Tradução Heloisa Coimbra de Souza. Disponível em: <https://bv4.digitalpages.com.br/?from=listas-de-leitura#/legacy/2376> . Acesso em: 17 mar. 2019.

RIBEIRO, Maxwell ; GUIMARÃES, Samuel. 2016. **Redes Neurais utilizando tensorflow e keras**. disponível em: <http://revistas.unifenas.br/index.php/RE3C/article/view/231/163>.

SOUZA, Antônio Carlos Zambroni de et al. **Projetos, simulações e experiências em laboratório em sistemas de controle**. Rio de Janeiro: Interciência, 2014. 254 p.

## COMPARISON OF STRAIN AND LOAD OBTAINED VIA STRAIN GAGE BY WIRE AND WIRELESS TRANSMISSIONS

*Data de aceite: 01/06/2021*

*Submission date: 28/02/2021*

### **Raphael Basilio Pires Nonato**

CEFET/RJ, Mechanical Engineering  
Department

Nova Iguaçu – RJ

<http://lattes.cnpq.br/9331089672178927>

### **Luiz Carlos Gomes Sacramento Júnior**

CEFET/RJ, Control and Automation  
Engineering Department

Nova Iguaçu – RJ

<http://lattes.cnpq.br/8162881141817109>

### **Leonardo Ferreira Ribeiro**

CEFET/RJ, Control and Automation  
Engineering Department

Nova Iguaçu – RJ

<http://lattes.cnpq.br/2313504418470592>

**ABSTRACT:** One of the main methods to measure the strain of mechanical components addresses the application of piezoresistive strain gages. However, the design and posterior implementation of the physical infrastructure to perform this measurement induces a certain quantity of relative error when the experimental results are compared to those of the analytic calculation. Aiming at reducing this error, this paper scopes the comparison of strain and load measured via piezoresistive strain gage by wire and wireless transmissions. The structural element which strain and load are obtained refers

to a clamped beam made of anodized aluminum alloy subjected to a point load, mainly producing strain from bending. To accomplish this, a piezoresistive strain gage is adhered to the beam surface under tension. In the first experiment, a prototyping platform Arduino® was connected to the strain gage (method with wire). In the second, ESP 32® (wireless) replaced the Arduino®. When the comparison between wire and wireless methods is made, it can be verified that the method with wire provides less relative error between experimental and analytical results. This allows the conclusion that the configuration with wire is more appropriate when more accurate strain and load results are desired.

**KEYWORDS:** Strain gage, strain and load measurement, wire and wireless transmissions.

## 1 | INTRODUCTION

The strain measurement has wide applicability in science and engineering and its contribution for these knowledge areas includes the determination of material properties, displacements, stresses, behavior at last. The prediction of a structural behavior under settled circumstances is of great interest because very often there are discrepancies between the design and the product conceived, according to Nonato and Pastoukhov (2012). Besides that, there are also regulatory standards that constrain the execution of this type of measurement, being some of them in the presence of the customer combined with reporting. Therefore, strain

measurement systems are present in the most diverse branches of industry, highlighting oil and gas, aeronautic, and automotive.

## 1.1 Background and fundamental concepts

In 1843, Charles Wheatstone applied an electronic circuit capable of measuring small signals of electrical resistance variation and called it Wheatstone bridge. In 1856, William Thomson found that the resistance of copper and iron conductors subjected to tensile loading presented measurable variation. Thenceforth, a wide variety of procedures and equipment aiming at measuring strain emerged. The first equipment were essentially mechanic and produced a considerable amount of error. In 1937, after innumerable tests by researchers around the world, Edward Simons and Arthur Ruge proposed the acquisition of strain adhering metallic wires to the surface of a specimen under test. Since then, this type of procedure has been enhanced, however keeping its essential principle: the variation of metallic wire length attached to the surface of the specimen corresponds to the variation of the electrical tension, which is captured by some equipment capable of doing it. This variation in electrical tension is linked to the body strain taking into account some material properties. Thenceforth, all the strain-dependent quantities can be extracted.

Currently, the most usual piezoresistive-based strain measurement system is schematically described by figure 1. The strain gage sensor is attached, as centralized as possible, to the point to which the measurement process needs to be performed. The strain gage is connected via wire to some board that captures the electrical tension variation. In other words, the referred board has the role of the Wheatstone bridge with the strain gage as one of its resistors. This board is connected to the computer, which has a black-box software or a tailor-made one specifically for the conditions under which measurement is performed. Figure 2 shows the main components of a typical strain gage that operates attached to the surface measured. Over a layer of a flexible insulation material, a resistive wire (made of constantan alloy, for example) is placed, which is covered with a layer of the same insulation material of the first layer. From the resistive wire, electrical wire terminations (made of tinned copper, for example) come out and represent the interface to which a board (for example, Arduino®) is connected. The resistive wire has an effective length, which is subjected to shortening (compression) or stretching (tension).

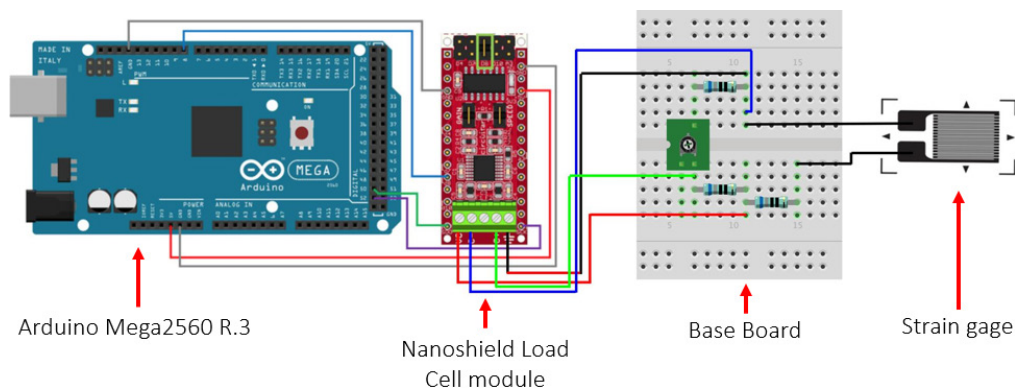


Figure 1. Scheme of a typical piezoresistive-based strain measurement system. Source: adapted from Silva et al. (2019).

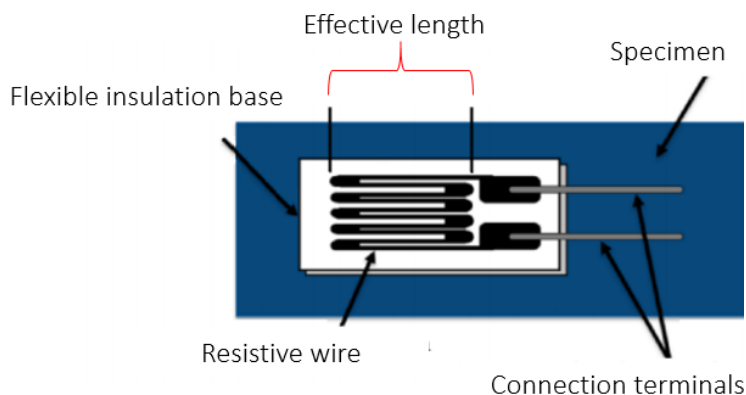


Figure 2. Main components of a piezoresistive strain gage sensor. Source: adapted from National Instruments (2020).

A widely applied type of strain gage is that made of metallic wire due to its relative high capacity to deform. Besides that, metal alloys typically employed in the gage are commonly selected to present the behavior similar to that of the material of the specimen under measurement. One of the most frequently available is constituted by flexible insulation layers made of polyimide or epoxy, and a resistive wire of a copper-nickel alloy (constantan, for example). The grid configuration maximizes the quantity of wire elements disposed in the strain direction to be measured, minimizing the cross-sectional area of each wire element, which intends to reduce Poisson's effect. Therefore, the strain is transferred from the specimen to the sensor, in order to lose as little as possible in terms of behavior capture.

## 1.2 Sensor sensitivity

A measuring instrument can have its sensitivity defined as the ratio between the variation in the output signal and the variation in the input signal, according to Keil (2017). In

the case of the strain gage sensor, the input and output signals are, respectively, the strain and the variation of the electrical resistance,  $\Delta R$ , relative to its initial magnitude,  $R$ , i.e.  $\Delta R/R$  in Equation 1, which establishes the described relation between input and output signals:

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon, \quad (1)$$

where  $k$  is the so-called gage factor, which establishes the proportionality between input and output signals, and  $\varepsilon$  is the normal strain (measured along the effective length of the strain gage). Conceptually, in the context of small deformations theory, the strain  $\varepsilon$  may be expressed by the variation of the effective length,  $\Delta L$ , relative to its initial effective length magnitude,  $L$  (see Figure 2), represented by Equation 2:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}. \quad (2)$$

Substituting Equation (2) into Equation (1), the gage factor  $k$  can now be expressed in the following manner (Equation 3):

$$k = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}}. \quad (3)$$

This concept came from researches in which the main results were given in terms of experimentally obtained diagrams  $(\Delta R/R) \times (\varepsilon)$ , as conceived by Bertodo (1959), for example. Observing Ohm's law, the resistance is given by Equation 4:

$$R = \frac{\rho L}{A}, \quad (4)$$

where  $\rho$  is the resistivity of the wire material and  $A$  is the cross-sectional area of the wire. The premises on which these expressions are based correspond to conservation of volume, energy, and temperature, the fact that the wire is prismatic, and the restriction to not exceed the elastic limit of the wire material. Although the mathematical development related to these premises will not be reproduced here for simplicity purposes, the result of the combination of Equations 3 and 4 provides Equation 5:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L}(1 + 2\nu), \quad (5)$$

where  $\Delta \rho/\rho$  corresponds to the part of the electrical resistance variation due to volume change, and the other contribution of the right hand side of Equation 5 represents the electrical resistance variation due to the geometrical variation of the wire. Furthermore, Bridgeman (see Koch et al. (1952) for details) discovered a proportionality factor  $\phi$  (expressed in Equation 6) which determines the existence of a proportional relation between

the specific variation of the resistivity  $\Delta\rho/\rho$  and the specific variation of the volume  $\Delta V/V$  for certain metals (for example, copper-nickel alloys).

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \phi \frac{\Delta V}{V}. \quad (6)$$

Combining Equations 5 and 6, it is possible to obtain an equation that relates the specific variation of the electrical resistance due to the geometrical and resistivity parts (Equation 7):

$$\frac{\Delta R}{R} = \phi \frac{\Delta L}{L} (1 - 2\nu) + \frac{\Delta L}{L} (1 + 2\nu). \quad (7)$$

Rearranging Equation 7, the gage factor equation is now expressed by Equation 8:

$$\frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}} = \phi(1 - 2\nu) + (1 + 2\nu), \quad (8)$$

in which the right hand side of Equation 8 distinguishes two generating factors of resistance variation, change in the resistivity and in the geometry, respectively.

### 1.3 Measurement circuit

In order to measure strain with a piezoresistive sensor, it is necessary to connect it to an electrical circuit capable of interpreting resistance variations. This role can be performed by the Wheatstone bridge, which is a circuit that allows the measurement of static and dynamic electrical resistance, besides having the possibility to eventually take into account temperature compensation. Figure 3 shows a scheme of a Wheatstone bridge, with four resistors and the input ( $V_i$ ) and output ( $V_o$ ) electrical tensions connected to the points 2 and 3, and 1 and 4, respectively.

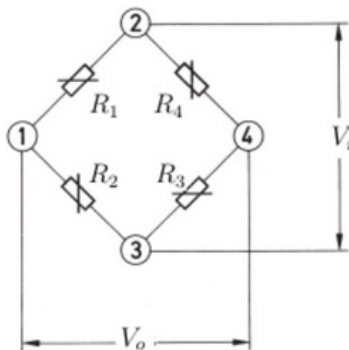


Figure 3. Wheatstone bridge. Source: HBM (2020).



Its main characteristic is the possibility of achievement of a null difference of electrical potential  $V_o$  just adjusting the resistance values, i.e. the bridge is said to be in equilibrium when the products of the opposite resistances result in the same value, according to the Equation 9:

$$R_1 R_3 = R_2 R_4. \quad (9)$$

In the case of resistance variation in any resistor, a non-null potential difference (proportional to this variation) is established, i.e. a degree of imbalance is caused. From this perspective, if one of the four resistors is replaced by a strain gage, any variation in its resistance causes a variation in electrical tension, which can be captured by an equipment capable of reading this quantity.

#### 1.4 Clamped beam subjected to bending from a concentrated load

The mathematical model studied in this work is based on the Euler-Bernoulli beam theory as can be seen in Figure 4.  $F$  is the applied load (by means of standard weight blocks),  $L$  is the distance between the point of load application and the medium point of the strain gage (sg) adhesion,  $b$  and  $h$  are the base and the height of the rectangular cross-section, respectively.

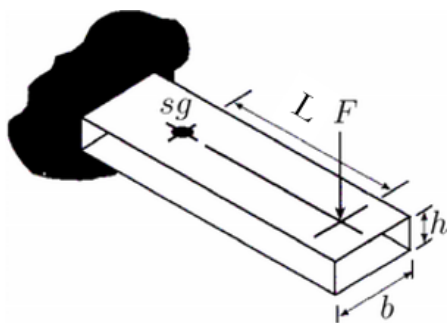


Figure 4. Scheme of the physical situation under analysis. Source: own authorship (2020).

Leaving aside the preamble of the development of this theory, which is not part of the scope of this work, the positive strain at the upper surface of the beam is given by Equation 10:

$$\varepsilon_{SG} = \frac{FLy}{EI}, \quad (10)$$

Where  $y$  is the distance from the neutral fiber to the fiber in which the calculation is performed,  $E$  is the elasticity modulus, and  $I$  is the moment of inertia of area.

According to Morris (2001), for the situation of one strain gage connected in the configuration of a quarter of the wheatstone bridge and neglecting any strain other than mechanical strain, the relation between the electrical tension and the strain is given by Equation 11:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{k}{4} \varepsilon_{SG}, \quad (11)$$

in which  $V_o$  is the electrical tension from the strain gage deformation (output) and  $V_i$  is the electrical tension from the external supply (input). Since the strain gage is attached to the upper surface and the neutral axis of the cross-section is located at its centroid, the distance  $y$  assumes the value  $h/2$ . In addition, for rectangular cross-sections, the value of the moment of inertia  $I$  is equal to  $bh^3/12$  and Newton's second law is considered ( $F = mg$ ). Thenceforth, combining Equations 10 and 11 with these assumptions and statements yields Equation 12 in order to obtain the expected applied mass:

$$m = \frac{2}{3} \frac{E}{gk} \frac{V_o}{V_i} \frac{bh^2}{L}, \quad (12)$$

Which is the experimental mass  $m$  captured by the measurement system when all the input data are measured in the referred experiment. In order to check its accuracy, this value is compared to the theoretical value of the standard weight block inserted on the system. Then, Equation 10 can now be applied to calculate the strain at the location of the strain gage.

## 2 | MATERIALS AND METHODS

This section refers to the description of the physical infrastructures with wire and wireless, highlighting the interfaces, connections, and the strain gage itself, besides the description of the experiments conducted aiming at measuring the strain and obtaining values as close as possible to the masses of the standard weight blocks employed in the experiment.

### 2.1 Physical infrastructure with wire

The structural element, object of the strain measurement, is an anodized aluminum alloy clamped beam to which a concentrated load is applied. This load derives from a standard weight positioned at its free end. A bench vice is employed to fasten the other end of the bar aided by an industrial C-clamp (see Figure 5). The strain gage is adhered to the upper surface of the rectangular cross-sectional bar (see Figure 6) and is connected to the base board, which in turn is connected to the module HX711® (responsible for converting an analogic signal to a digital one, besides amplifying it). The Arduino® platform receives the data from the HX711® module, which is transferred to the supervision station, where

this data is stored and then analyzed. In this configuration, the USB cable, in addition to powering up the system, has also the function of sending the data from the Arduino® to the supervision station (see Figure 7).

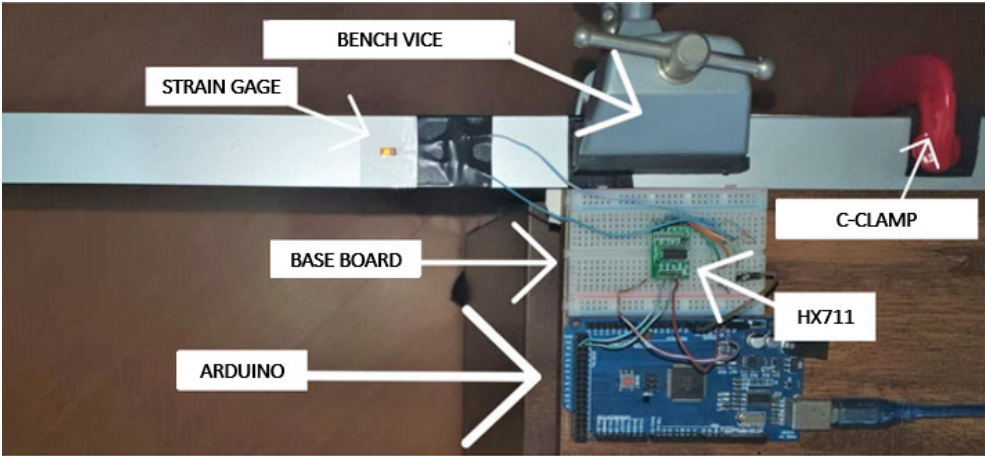


Figure 5. Final assembly of the wire configuration. Source: own authorship (2020).

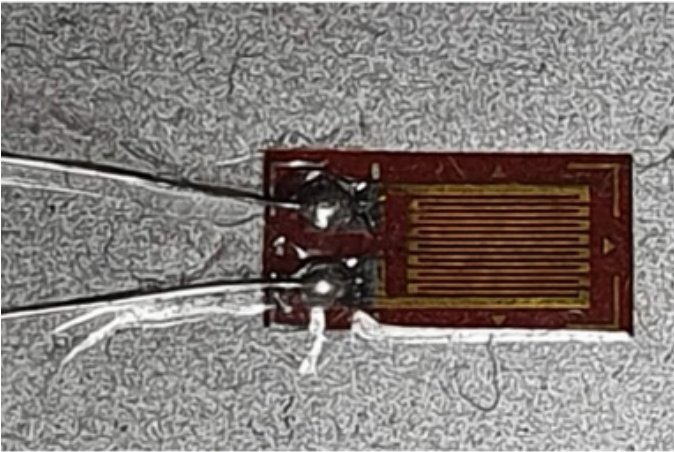


Figure 6. Strain gage attached to the upper surface of the bar. Source: own authorship (2020).

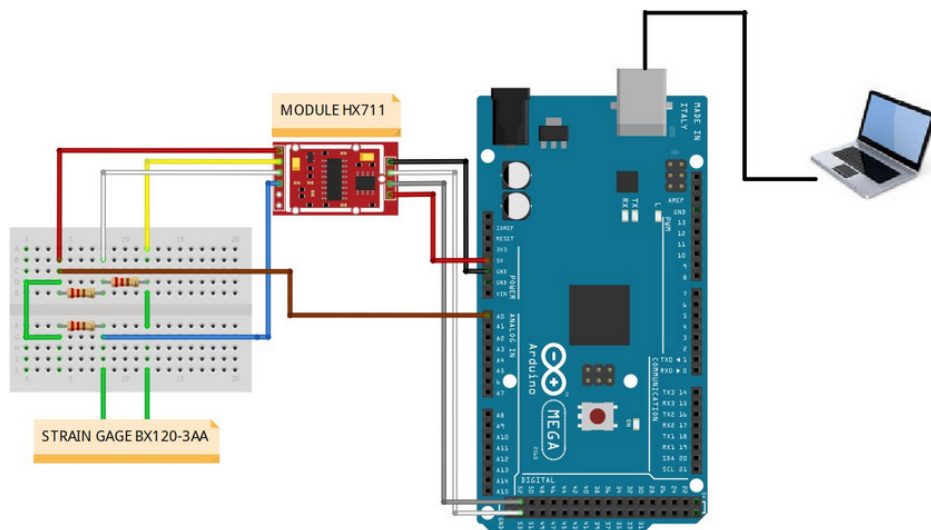


Figure 7. Scheme of the connections between the components for the wire configuration.

Source: own authorship (2020).

## 2.2 Wireless physical infrastructure

The main distinction to be made between the system dotted with wires and the wireless is the replacement of the Arduino® platform by an ESP 32® platform, since the ESP 32® has an integrated Wi-Fi module. In this way, the data is captured in the same way as using the Arduino®, although the use of the USB cable in this configuration is only to power up the ESP 32® (the data transfer between ESP 32® and supervision station is wirelessly, see Figures 8 and 9).

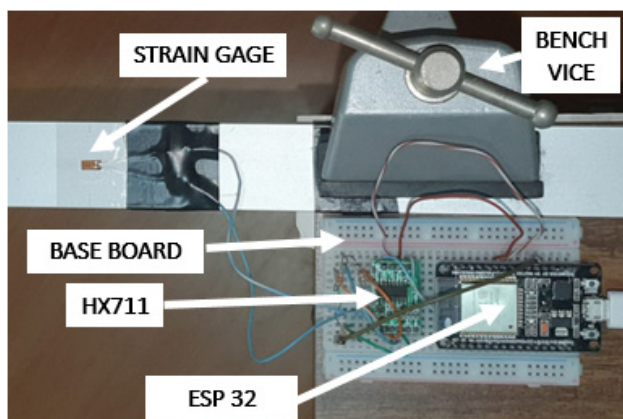


Figure 8. Final assembly of the wireless configuration. Source: own authorship (2020).

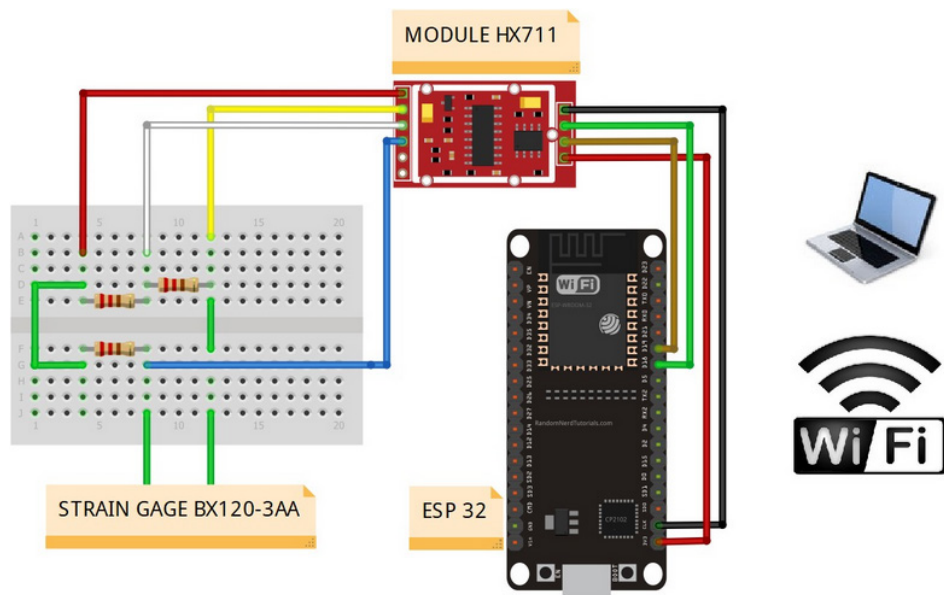


Figure 9. Scheme of the connections between the components for the wireless configuration.  
Source: own authorship (2020).

The resistance variation from the strain gage is detected by the HX711® module, which amplifies the received signal and send it to the micro-controlled prototyping platform ESP 32®. In its turn, ESP 32® sends the data through its Wi-Fi system to a supervision station to store the output (mass and deformation).

### 2.3 Experiments

Two main categories of experiments were conducted, one with the transmission by wire, and another wirelessly. In each configuration, five measurements are performed with each standard weight block. A mean and a standard deviation were calculated from each situation of mass positioned. Four standard weight blocks (0.050, 0.100, 0.150, and 0.200 kg of mass) were used in the experiment of each configuration (wire and wireless). The experimental input and output data were those from Equation 12. Thenceforth, the strain at the beam can be calculated by Equation 10. Although they are standard weight blocks, the theoretical values of masses employed were double-checked in a precision scale. Both configurations were subjected to 26°C of ambient temperature and were not subjected to considerable external vibrations (as far as we could observe, not enough to invalidate the experiments). The following flowchart in Figure 10 intends to explain the sequence of steps performed.

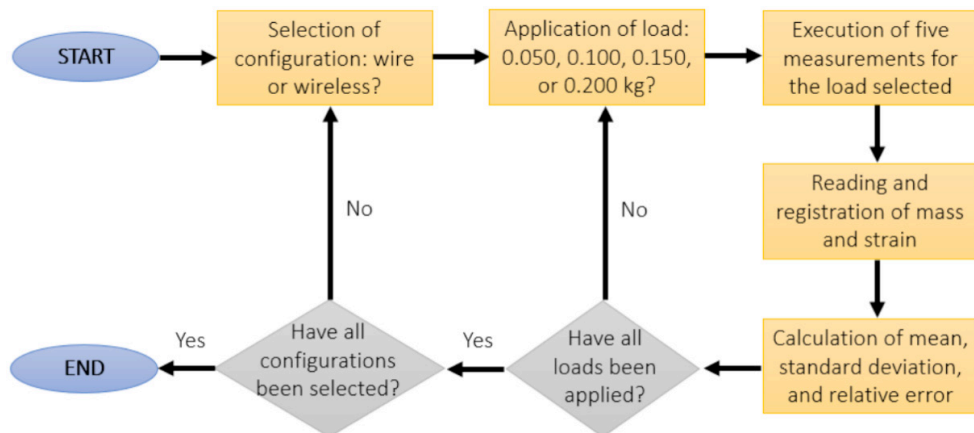


Figure 10. Flowchart of the experimental process. Source: own authorship (2020).

### 3 | RESULTS AND CONCLUSIONS

Strain measurement, reading, and recording were performed in two systems: with wire and wireless. Both were ran to output twenty measurements each (five times each of the four standard weight blocks), which resulted in output data expressed in terms of mass and strain. These results were also compared to the theoretical values of the involved quantities. Figures 11, 12, 13, and 14 show the comparison of the theoretical values of masses of the standard weight blocks of 0.050, 0.100, 0.150, and 0.200 kg, respectively, with the mean values experimentally obtained by the wire and the wireless methods. In addition, the same procedure was adopted for the strain, which values of theoretical strain are  $72.004 \times 10^{-6}$ ,  $144.010 \times 10^{-6}$ ,  $216.010 \times 10^{-6}$ , and  $288.020 \times 10^{-6}$ , respectively.

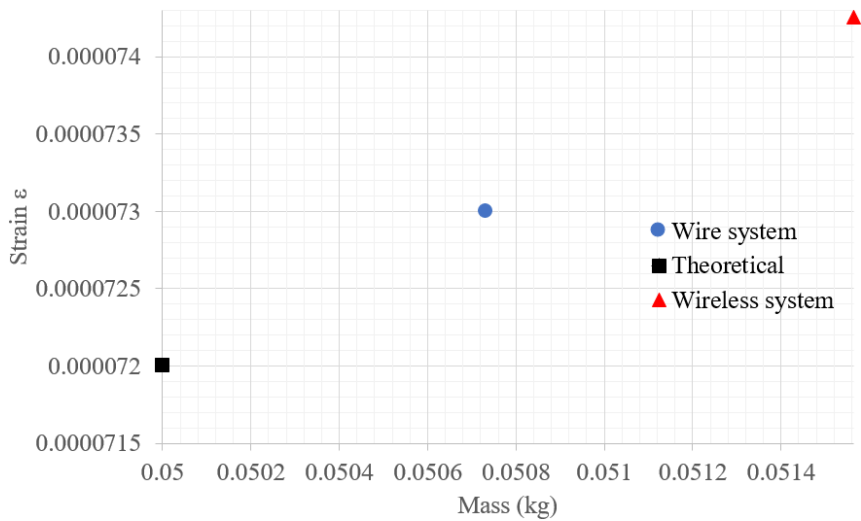


Figure 11. Statistic means of wire and wireless systems compared to the theoretical mass  $m = 0.050$  kg. Source: own authorship (2020).

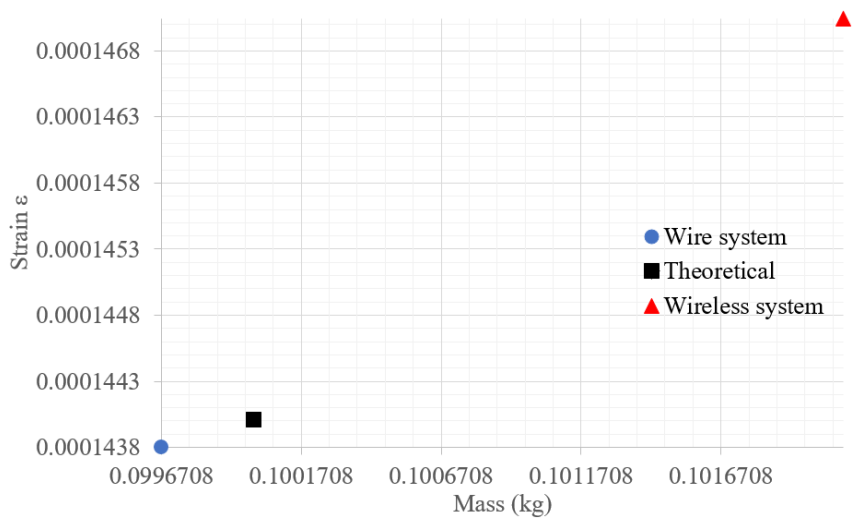


Figure 12. Statistic means of wire and wireless systems compared to the theoretical mass  $m = 0.100$  kg. Source: own authorship (2020).

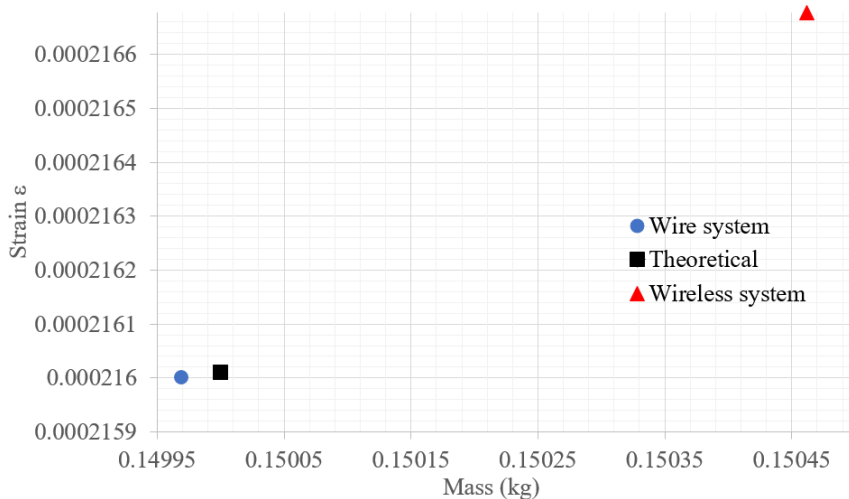


Figure 13. Statistic means of wire and wireless systems compared to the theoretical mass  $m = 0.150$  kg. Source: own authorship (2020).

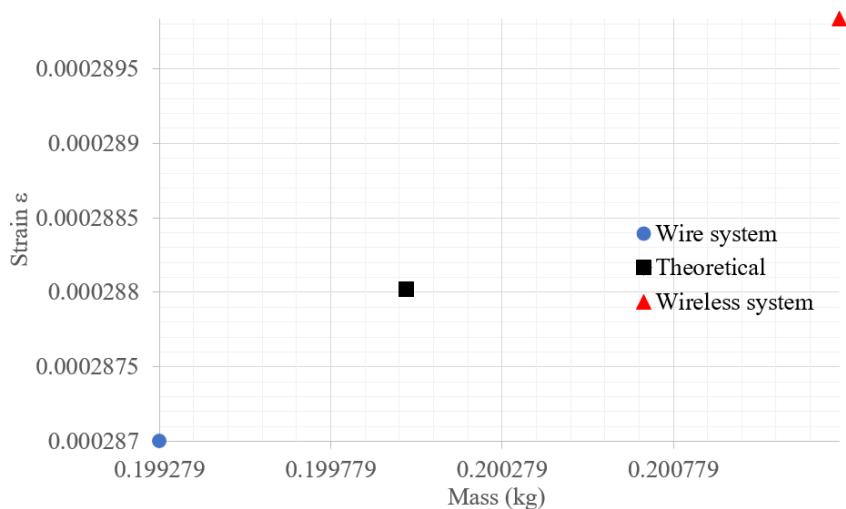


FIGURE 14. Statistic means of wire and wireless systems compared to the theoretical mass  $m = 0.200$  kg. Source: own authorship (2020).

The results for masses are also presented in Tables 1 and 2 (wire and wireless configurations, respectively), and for strains in Tables 3 and 4, respectively, where the five measurements (from first to fifth column) were taken for each positioning of standard weight block, also showing their corresponding mean values (sixth column) and standard deviations (seventh column) of each table.



1st meas.(kg)	2nd meas. (kg)	3rd meas.(kg)	4th meas.(kg)	5th meas.(kg)	Mean(kg)	St. dev. (kg)
0.0501160	0.0522420	0.0497430	0.0513800	0.0501810	0.0507324	0.0009339
0.0976710	0.1017800	0.0985030	0.1004220	0.0999780	0.0996708	0.0014471
0.1523010	0.1506470	0.1486470	0.1490230	0.1492300	0.1499696	0.0013481
0.2027690	0.1998330	0.1993120	0.1976330	0.1968500	0.1992794	0.0020541

Table 1. Measurements of mass for the wire configuration. Source: own authorship (2020).

1st meas.(kg)	2nd meas.(kg)	3rd meas.(kg)	4th meas.(kg)	5th meas.(kg)	Mean(kg)	St. dev. (kg)
0.0510885	0.0518006	0.0513296	0.0515196	0.0513718	0.0514220	0.0002346
0.1021774	0.1021438	0.1021509	0.1026839	0.1024565	0.1023225	0.0002149
0.1504047	0.1503360	0.1500972	0.1502067	0.1502593	0.1502608	0.0001059
0.2009010	0.2013217	0.2015586	0.2013080	0.2013080	0.2012794	0.0002119

Table 2. Measurements of mass for the wireless configuration. Source: own authorship (2020).

1st meas.	2nd meas.	3rd meas.	4th meas.	5th meas.	Mean	St. dev.
0.0000720	0.0000750	0.0000720	0.0000740	0.0000720	0.0000730	0.0000013
0.0001410	0.0001470	0.0001420	0.0001450	0.0001440	0.0001438	0.0000021
0.0002190	0.0002170	0.0002140	0.0002150	0.0002150	0.0002160	0.0000018
0.0002920	0.0002880	0.0002870	0.0002850	0.0002830	0.0002870	0.0000030

Table 3. Measurements of strain for the wire configuration. Source: own authorship (2020)

1st meas.	2nd meas.	3rd meas.	4th meas.	5th meas.	Mean	St. dev.
0.0000736	0.0000746	0.0000739	0.0000742	0.0000740	0.0000741	0.0000003
0.0001471	0.0001471	0.0001471	0.0001479	0.0001475	0.0001474	0.0000003
0.0002166	0.0002165	0.0002162	0.0002163	0.0002164	0.0002164	0.0000002
0.0002893	0.0002899	0.0002903	0.0002899	0.0002899	0.0002899	0.0000003

Table 4. Measurements of strain for the wireless configuration. Source: own authorship (2020)

By observing Tables 1 and 2, the means of the masses from the wire configuration are more accurate, although the wireless system presents results with lesser dispersion (standard deviations). In general, this behavior is also reproduced in the analysis of strain data presented in Tables 3 and 4. Tables 5 and 6 show the relative errors calculated for wire and wireless configurations, respectively, related to the theoretical values. It is important to note that the relative errors from the wireless configuration are higher than the error from other configuration. Except for the unique characteristics of each experiment, great part of this error may be explained by the way of data transmission.

Therefore, by observing the referred Tables, it can be concluded that for more accurate results in terms of mass, and consequently, strain, the system dotted with wire should be used. Summarizing, the wire configuration can retrieve a more accurate expected value for mass and strain, however providing results with greater dispersion. The wireless system, despite its capacity to generate results with lesser dispersion, retrieved expected values of mass and strain with less accurate values.

Mean (kg)	Standard block mass (kg)	Relative error (%)
0.0507324	0.0500000	1.4648000
0.0996708	0.1000000	0.3292000
0.1499696	0.1500000	0.0202667
0.1992794	0.2000000	0.3603000

Table 5. Calculation of the relative error of mass for wire configuration. Source: own authorship (2020)

Mean (kg)	Standard block mass (kg)	Relative error (%)
0.0515649	0.0500000	3.1298222
0.1021093	0.1000000	2.1093414
0.1504617	0.1500000	0.3078138
0.2012638	0.2000000	0.6318852

Table 6. Calculation of the relative error of mass for wireless configuration. Source: own authorship (2020)

## REFERENCES

BERTODO, R. **Development of high-temperature strain gauges**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, v. 173, n. 23, p. 605-616, 1959.

HBM: **Circuito de ponte de Wheatstone**. Available in: <<http://www.ni.com/white-paper/3642/pt/>>. Access on: 26 aug. 2020.

KEIL, S. **Technology and Practical Use of Strain Gages: With Particular Consideration of Stress Analysis Using Strain Gages**. John Wiley & Sons, Berlin, Germany, 512 p., 2017.

KOCH, J. J.; BOITEN, R. G.; BIERMASZ, A. L.; ROSZBACH, G. P.; VAN SANTEN, G. W. **Strain Gauges – Theory and Application**. Elsevier, Houston, USA, 95 p., 1952.

MORRIS, A. S. **Measurement and Instrumentation Principles**. Butterworth Heinemann, Oxford, England, 512 p., 2001.

NATIONAL INSTRUMENTS: **Measuring strain with strain gages**. Available in: <<https://www.ni.com/pt-br/innovations/white-papers/07/measuring-strain-with-strain-gages.html>>. Access on: 26 aug. 2020.

NONATO, R. B. P.; PASTOUKHOV, V. **Criação de diferenciais competitivos de mercado por meio de metodologia estruturada de projeto.** Revista Ciências Exatas, v. 18, p. 23-34, 2012.

SILVA, A. L.; VARANIS, M.; MERELES, A. G.; OLIVEIRA, C.; BALTHAZAR, J. M. **A study of strain and deformation measurement using the Arduino microcontroller and strain gauges devices,** v. 41, n. 3, p. 1-7, 2019.

## SISTEMA AUTOMATIZADO DESTINADO À ALIMENTAÇÃO DE ANIMAIS DE PEQUENO PORTE

Data de aceite: 01/06/2021

### **Eliezer Silva Bonfim de Jesus**

Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia da Bahia  
Simões Filho – BA

### **Guilherme de Souza Carneiro Meireles**

Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia da Bahia  
Simões Filho – BA

### **Josedacson Barbosa de Lacerda**

Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia da Bahia  
Simões Filho – BA

### **Kevin Ruan dos Reis Oliveira**

Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia da Bahia  
Simões Filho – BA

### **Rúi Carlos de Sousa Mota**

Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia da Bahia  
Simões Filho – BA

**RESUMO:** Este projeto possui como base a automação residencial, visando a reposição e alimentação de animais de pequeno porte, sem restrições de lugares específicos. Durante a execução do trabalho, a preocupação foi desenvolver um sistema de baixo custo e de fácil manuseio, a fim de proporcionar mais conforto e tranquilidade aos seus usuários. Deste modo, o indivíduo poderá controlar o sistema através de

um smartphone Android, conectado ao Arduino.

**PALAVRAS-CHAVE:** Automação Residencial, Alimentação, Animais, Conforto, Smartphone Android, Arduino.

**ABSTRACT:** This project is based on residential automation, aiming the monitoring and feeding of small animals, without restrictions of specific places. During the execution of the work, the concern was to develop a system of low cost and easy handling, in order to provide more comfort and tranquility to its users. Thus, the individual can control the system through an Android smartphone connected to the Arduino.

**KEYWORDS:** Home Automation, Alimentation, Animals, Confort, Android Smartphone, Arduino.

## 1 | INTRODUÇÃO

Segundo dados do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) em 2013, 44,3% dos domicílios brasileiros possuíam pelo menos um cachorro, ou outro animal, o que resulta em cinquenta e dois milhões de cachorros e vinte milhões de gatos em domicílio no Brasil. Com o aumento dos animais também aumenta a variedade de produtos e serviços oferecidos para atender esse nicho de mercado (OCHAKOWSKI, 2007).

A partir daí, é perceptível que aliado ao número crescente de animais domésticos, há a ascensão dos vínculos afetivos entre homens e seus animais de estimação, todavia nem sempre é possível manter fielmente estas relações:

trabalho, férias, viagens, entre outras ocorrências, fazem com que diversas vezes, o dono esteja distante do seu pet.

*O comportamento alimentar de um indivíduo corresponde, não apenas aos chamados hábitos alimentares, mas também a todas as práticas relativas à alimentação como seleção, aquisição, conservação, preparação e consumo efetivo dos alimentos. (SUZUKI, 2015)*

*A partir daí, percebe-se, de fato, a importância do cuidado relativo ao método alimentar dos animais. Ressaltando o quanto é preciso estabelecer e cumprir um horário correto à alimentação, definir o método que será utilizado para o armazenamento de comida, dentre outras funcionalidades.*

*Este artigo encontra-se organizado da seguinte forma: a seção 2 apresenta, em tópicos, as intenções na elaboração do projeto. A seção 3 descreve produções similares encontradas no mercado e faz as devidas comparações com nosso dispositivo. O mecanismo é apresentado detalhadamente na seção 4, enquanto os materiais que o constitui é especificado na seção 5. Discussões relacionadas ao processo e finalização do trabalho são apresentadas na seção 6 e a conclusão juntamente com propostas futuras são comentadas na seção 7.*

## **2 | OBJETIVOS GERAIS/ESPECÍFICOS**

2.1 Desenvolver um sistema automático de alimentação para animais que possibilite ao usuário executar a reposição do prato de comida, sempre que necessário.

2.2 Criar um aplicativo Android que permita ao indivíduo abastecer o pote de comida.

2.3 Realizar a integração entre os compartimentos do dispositivo e o aplicativo para a liberação de comida ao animal.

## **3 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICAS**

Atualmente, é possível encontrar presente no mercado inúmeros modelos de alimentadores automáticos para animais de estimação (OCHAKOWSKI, 2007, p.15). Desta forma, cada um possui uma destinação, ou uma finalidade específica, como veremos adiante.

O Pet Feeder é um modelo de alimentador automático. Este tem capacidade para armazenar dezenove quilos de ração no reservatório e dispõe de uma estrutura semelhante ao do Wing Feeder (ET AL TECNOTRI, 2005).

Por outro lado, Nádia Ochakowski criou um protótipo que se preocupa não só com a automação, como também, com as sobras no recipiente, propondo um método resolutivo (OCHAKOWSKI, 2007, p.16).

Apesar das funcionalidades apresentadas, os produtos citados anteriormente, não possuem controle externo sobre os protótipos, limitando o uso a escala presencial, ou numa esfera de programação fechada, fazendo com que possivelmente, sobre comida, ou falte, até porque, não há uma gerência no comportamento alimentar do bicho. Sendo assim, aliada a proposta de abastecimento por subsistência, propõe-se a criação de um sistema que permita o controle através da esfera externa, ou seja, de qualquer lugar do mundo.

#### 4 | MATERIAIS E MÉTODOS

Os responsáveis pelo projeto e montagem da estrutura física do protótipo pesquisaram formatos e materiais que superassem dificuldades, como por exemplo, o mau armazenamento de comida e sobras em aresta.

LISTA DE MATERIAIS	
- Internet	- MIT App inventor 2
- Shield ethernet	- Arduino uno R3
- Roteador	- Servo motor
- Cabos de rede	- Cabos tipo jumper
- Fonte de alimentação 12V	- Chapas de vidro
- Pote para ração	- Chave de fenda
- Celulares	- Serra circular
- Protoboard	- Cola de silicone

Conforme a ilustração da imagem a seguir (Figura 1.0), o modelo físico do dispositivo consiste em um paralelepípedo na parte superior que vai se estreitando na parte inferior em formato de pirâmide invertida criando um quadrado em sua base inferior.

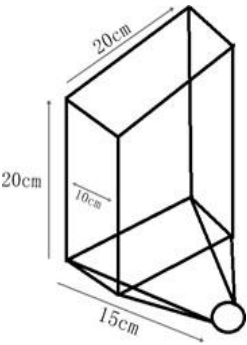


Figura 1.0 – Modelo primário da estrutura física do dispositivo. (Imagem produzida pelos autores)

Nesta base encontra-se um disco (com abertura determinada) controlado pelo servo para o controle da saída de comida. Este formato de pirâmide invertida foi escolhido para minimizar as sobras acumuladas nas arestas, já que a abertura para a saída de comida é fixa.

O trabalho de desenvolvimento do protótipo foi dividido em três partes para facilitar a pesquisa. Dois integrantes trabalharam com o Arduino, programando-o para criar uma página HTML e controlar um servo motor através dela, o que possibilita a alimentação à distância do animal de estimação. Os responsáveis pelo desenvolvimento de um aplicativo trabalharam com a plataforma MIT *App Inventor 2* criando um programa que se comunicasse diretamente com o Arduino, através da página HTML e permitisse ao usuário escolher qual dispositivo acessar por meio de um Login. Desta forma, cada um possui uma destinação, ou uma finalidade específica, como veremos adiante.

Para desenvolver o aplicativo Android, utilizou-se a plataforma MIT App Inventor 2. Sua interface gráfica é uma importante característica, por ser um tanto “amigável” com o usuário. De fato, o sistema possibilita que até mesmo um usuário sem experiência, possuindo de conhecimentos básicos sobre lógica de programação, elabore um App com diferentes funcionalidades.

“A interface utiliza a biblioteca Java de código aberto Open Blocks para criação de um ambiente visual de programação, semelhante a um diagrama de blocos” (BEGHINI, 2013, p.33).

Seguindo este raciocínio, tem-se que este ambiente funciona como um “quebra-cabeças”. O criador fornece alguns componentes, como botões, e permite dar funcionalidades a eles. De acordo com os desenvolvedores da plataforma, o sistema pode ser utilizado para um modo de aprendizagem de ideias rápidas e constantes.

A partir daí, temos o sistema em forma de diagrama, com a esquematização da lógica seguida, presentes na imagem abaixo (Figura 1.1):

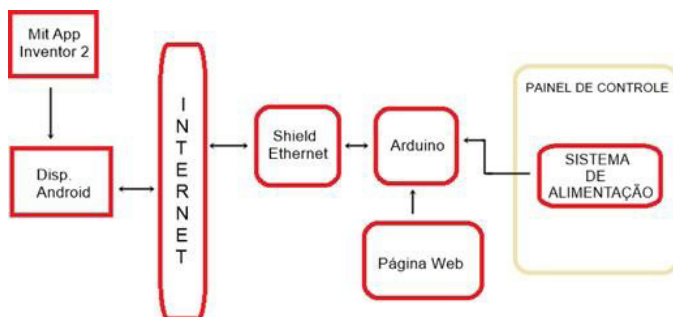


Figura 1.1 – O sistema.  
(Imagem produzida pelos autores)

Diante do esquema apresentado, e de acordo com os conceitos abordados, A programação do protótipo se deu da seguinte forma: o Arduino cria uma página HTML para realizar a comunicação. Depois de gerada, confere se o botão programado para ligar a máquina foi acionado na mesma. Se não, o sistema retorna com os dados, entretanto, se houver resposta, movimenta-se o servo até a posição 110° (adequada para a porção desejada) e aguardar 5 segundos.

Novamente, movimenta-se o servo à posição 10° e começa a contar o tempo do zero. Os resultados são exibidos no conteúdo da página, e o sistema volta ao status inicial, formando um ciclo.

## 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante a primeira semana de testes, o módulo Bluetooth foi usado, visto que o sistema de comunicação é de uma complexidade menor. Com o passar do tempo, fomos ampliando a ideia, e aprimorando para uma situação real, utilizando o Shield Ethernet, com uma comunicação externa, fato já citado anteriormente.

Chegando no início do segundo mês, terminamos a estrutura física do protótipo utilizando chapas de vidro e iniciamos os testes para verificar o ângulo correto de rotação do servo para o abastecimento de uma porção. Simulamos o funcionamento do protótipo para identificarmos possíveis falhas e planejamos ajustes corretivos no modelo

Já nas semanas restantes, nos dedicamos a testar o IP público em comunicação com o aplicativo. Dando prosseguimento aos testes, todavia encontramos um problema: nem todos os potes de comida, possuem as mesmas dimensões, por essa razão, a porção pode não atender os requisitos de cada usuário, além de ser uma plataforma fechada, onde o ângulo é fixo, e não pode ser alterado, senão pelo Arduino.

Por essa razão, segue como proposta, a pesquisa de novas formas de distribuição ou aprimoramento da mesma, para proporcionar conforto ao indivíduo.

Também se torna válido ressaltar que a plataforma App Inventor, não cumpriu todos os requisitos planejados (como por exemplo, por não ser permitido que a aplicação funcione em segundo plano, houve um problema para gerenciar o tempo de resposta ao usuário, já que o aplicativo atua como um “alerta”, que por sua vez, deve sempre estar ligado, e não apenas quando está aberto). Entretanto, mostrou ser uma ótima alternativa no setor de desenvolvimento de aplicativos Android, devido a sua vasta acessibilidade. Embora com algumas imperfeições, é essencial destacar a importância do Arduino no projeto apresentado, por ser o componente responsável por coordenar grande maioria do sistema.





Figura 2.0 – Modelo físico real do dispositivo.

## 6 | CONCLUSÕES

Tendo base nos fatos expostos, é possível concluir que o objetivo geral pode ser cumprido. Atualmente, automatizar tarefas cotidianas tem sido uma tarefa cada vez mais inacessível a indivíduos de classe média ou baixa. Sendo assim, o Arduino Uno se mostrou uma ferramenta de rápida comunicação, e com uma relação custo-benefício viável para a construção de outros projetos que poderão surgir.

Para trabalhos futuros, a proposta é ampliar o projeto para uma escala comercial. A sugestão é utilizar o Wi-fi Shield, onde o cabo de rede não é utilizado e a conexão é realizada via Wireless. Esta alternativa é útil para lugares onde o Arduino, necessita ficar em uma distância expressiva do roteador. Além da opção de recriar a aplicação utilizando o Visual Studio, que possibilita mais funcionalidades, além de permitir a criação de aplicativos híbridos.

## REFERÊNCIAS

APPINVENTOR. Site oficial do App Inventor 2. Disponível em: <<http://ai2.appinventor.mit.edu/>> Acesso em 12 abr, 2017.

BEGHINI, Lucas. TCC de Engenharia Elétrica. Disponível em: <<http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180450/tce-04022014-152853/?&lang=br>> Acesso em: 2 abr, 2017.

IBGE. Pesquisa Nacional de Saúde. Ministério da Saúde, Rio de Janeiro, 2015.

MACHADO, Robson. Acesse o Arduino pela Internet – parte I. Disponível em: <<http://www.eaduino.com.br/2013/04/acesse-o-arduino-pela-internet-parte-i/>> Acesso em: 5 abr, 2017.

MCRBERTS, Michael. Arduino Básico. Edição em Português para o Brasil, Novatec Editora, 2011.

OCHAKOWSKI, Nádia. Protótipo de um alimentador automático para animais de estimação. URB, Blumenau, 2007.

ROBOCORE. Automação residencial Arduino Ethernet. Disponível em: <<https://www.robocore.net/modules.php?name=Forums&file=viewtopic&t=4053>> Acesso em: 2 abr, 2017.

SUZUKI, Vanessa. Comportamento alimentar em mulheres submetidas à abdominoplastia. São Paulo, 2015.

Monticelli, A. (1983). *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*. Edgar Blucher, Rio de Janeiro - RJ.

Morelato, A; Amaro,M. and Kokai,Y (1994). Combining Direct and Inverse Factors for Solving Sparse Network Equations in Parallel. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 9, No. 4, pp. 1942-1948.

## SOBRE OS ORGANIZADORES

**HENRIQUE AJUZ HOLZMANN** - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Tecnologia em Fabricação Mecânica e Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Doutorando em Engenharia e Ciência do Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Trabalha com os temas: Revestimentos resistentes a corrosão, Soldagem e Caracterização de revestimentos soldados.

**JOÃO DALLAMUTA** - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Engenharia de Telecomunicações pela UFPR. MBA em Gestão pela FAE Business School, Mestre em engenharia elétrica pela UEL. Doutorando em Engenharia Espacial pelo INPE.

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

AA8011 96, 97, 98, 101, 102, 103, 104, 105, 108  
Aço Inoxidável 49, 50, 53, 54, 58, 59  
Aeração 184, 185, 186, 187, 190, 192  
Alimentação 115, 120, 122, 249, 251, 300, 301, 302, 303  
Análise de Investimento 255  
Animais 300, 301, 306  
Ar Condicionado 175, 178, 181, 202, 203, 204, 238  
Automação e Controle 234  
Automação Industrial 234, 243, 268  
Automação Residencial 238, 241, 243, 300, 306

### B

Bananeira 1, 2, 3, 15, 16  
Bioenergia 19  
Biomassa 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 30, 238  
Briquetes 18, 19, 20, 21, 22, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31

### C

Carga Térmica 54, 175, 177, 178, 193, 195, 197, 199, 200, 201, 202, 203, 282  
Catia V5 211, 212, 220, 222, 224  
Climatização 187, 193, 194, 238, 239, 242, 244  
Compósito 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 15, 16, 249  
Conforto 209, 300  
Conforto Térmico 193, 194, 195, 199, 201, 202, 204, 205, 206, 209, 210  
Controle 6, 13, 112, 128, 166, 171, 173, 188, 207, 210, 234, 236, 237, 238, 240, 241, 242, 243, 244, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 282, 283, 302, 303  
Corrosão Intergranular 49, 50, 51, 54, 55, 58, 59  
Custos 2, 18, 20, 61, 97, 111, 112, 113, 116, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 151, 176, 234, 255, 256, 257, 262, 263

### E

Educação 1, 18, 30, 165, 166, 173, 174, 204, 245, 247, 253, 255, 300  
Eficiência 114, 116, 178, 180, 181, 190, 196, 234, 235, 236, 237, 238, 242, 243, 244

Eficiência Energética 18, 175, 177, 178, 181, 182, 183, 184, 196, 204, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244

Elementos Finitos 142, 143, 144, 148, 149

Energia 61, 76, 94, 98, 100, 120, 155, 178, 183, 189, 235, 236, 243, 245, 254, 257, 266, 267, 306

Energia Solar Fotovoltaica 245, 246, 254

Engenharia Mecânica 17, 49, 77, 95, 96, 111, 148, 150, 165, 166, 174, 182, 184, 192, 307

Ergonomia 193, 204, 211, 212, 213, 215, 220, 232

Extrusão 96, 97, 98, 100, 105, 107, 108, 109

## **F**

Fase Sigma 49, 50, 51, 53, 56

Fibra Natural 1

Fibra Vegetal 1, 2

## **I**

Índice de Calor 205, 206, 207, 208

Inteligência Artificial 150, 152, 154, 159, 237, 268, 283

## **L**

Laser 60, 61, 78, 79, 96, 97, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140

Liga AA7009 78

Liga AA7013 60

## **M**

Metalurgia do Pó 60, 61, 62, 71, 76, 77, 78, 79, 90, 94, 95, 96, 97, 98, 103

Metrologia 165, 166, 169, 170, 173, 174, 177, 183

Moagem de Alta Energia 60, 61, 62, 63, 66, 67, 68, 70, 71, 73, 74, 76, 78, 79, 80, 83, 84, 86, 89, 91, 92, 94, 96, 98, 100

## **O**

Ônibus 205, 206

## **P**

Piaçava 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30

Propulsão de Embarcações 245, 246

## **R**

Redes Neurais 150, 152, 237, 240, 243, 244, 268, 269, 272, 276, 282, 283

Refrigerador de Grãos 184, 186

Resíduo 19, 30, 54

## **S**

Sistemas Fotovoltaicos 255, 265, 266, 267

Soldagem 61, 62, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 307

Sustentabilidade 175, 234, 245, 253

## **T**

Temperatura de Corte 142, 148, 152

Temperatura do Ar 184, 189, 199, 200, 205, 206, 207, 208

Texturização 126, 128, 129, 130, 139

Torneamento 126, 130, 133, 135, 136, 139, 148, 150, 152, 156, 161

Tubos Canadianos 184, 186, 192

Tubulações Industriais 111, 112, 119

## **U**

Umidade Relativa do Ar 6, 195, 205, 206, 207, 208

Usinagem 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 134, 140, 141, 142, 143, 144, 146, 147, 148, 150, 151, 154, 156, 161

# Engenharia mecânica:

A influência de máquinas, ferramentas  
e motores no cotidiano do homem

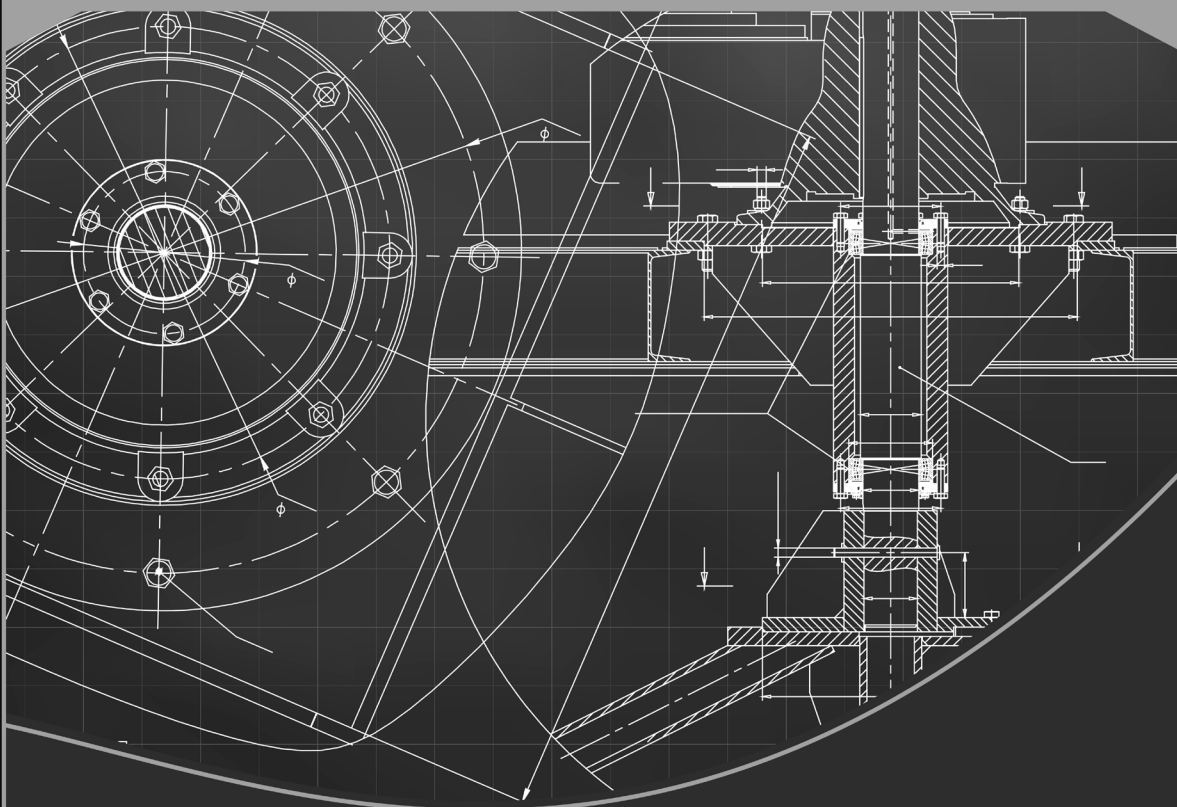
2

🌐 [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

✉ [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)

📷 @atenaeditora

📘 [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)



**Atena**  
Editora

Ano 2021

# Engenharia mecânica:

A influência de máquinas, ferramentas  
e motores no cotidiano do homem

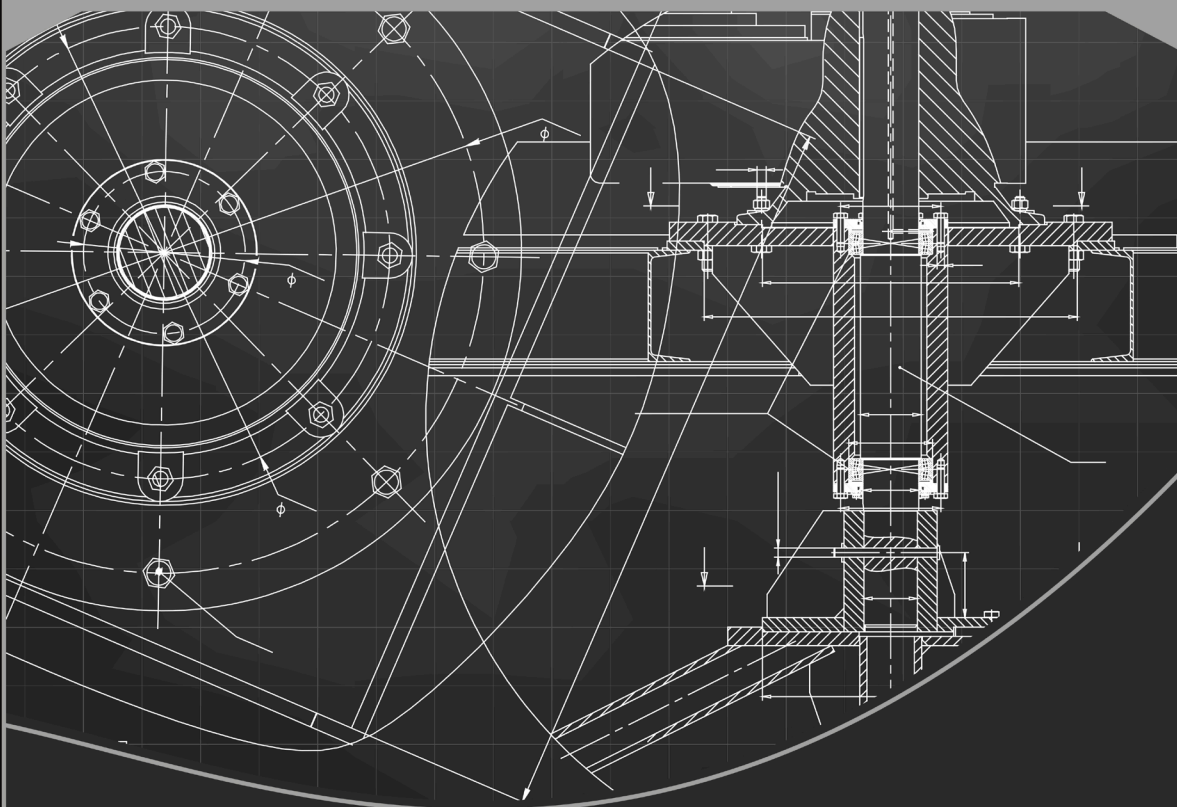
2

🌐 [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

✉ [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)

📷 @atenaeditora

📘 [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)



**Atena**  
Editora

Ano 2021