

# Estudos Transdisciplinares nas Engenharias

João Dallamuta  
(Organizador)

**Atena**  
Editora  
Ano 2019

**João Dallamuta**

(Organizador)

# Estudos Transdisciplinares nas Engenharias

Atena Editora  
2019

2019 by Atena Editora  
Copyright © Atena Editora  
Copyright do Texto © 2019 Os Autores  
Copyright da Edição © 2019 Atena Editora  
Editora Executiva: Profª Drª Antonella Carvalho de  
Oliveira Diagramação: Karine de Lima  
Edição de Arte: Lorena Prestes  
Revisão: Os Autores

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. 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.

### **Conselho Editorial**

#### **Ciências Humanas e Sociais Aplicadas**

Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionale delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

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

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

### **Ciências Biológicas e da Saúde**

Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina  
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

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

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

### **Conselho Técnico Científico**

Prof. Msc. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico  
Prof. Msc. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Prof.<sup>a</sup> Msc. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia  
Prof. Msc. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista  
Prof. Msc. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão  
Prof.<sup>a</sup> Msc. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal  
Prof. Msc. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará

<b>Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)</b>	
E82	Estudos transdisciplinares nas engenharias [recurso eletrônico] / Organizador João Dallamuta. – Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2019. – (Estudos Transdisciplinares nas Engenharias; v. 1)  Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-85-7247-355-2 DOI 10.22533/at.ed.552193005  1. Engenharia – Pesquisa – Brasil. 2. Transdisciplinaridade. I. Dallamuta, João. II. Série.  CDD 620
<b>Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422</b>	

Atena Editora

Ponta Grossa – Paraná - Brasil

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

contato@atenaeditora.com.br

## APRESENTAÇÃO

Caro(a) leitor(a)

Nesta obra temos um compendio de pesquisas realizadas por alunos e professores atuantes em ciências exatas, engenharia e tecnologia. São apresentados trabalhos teóricos e vários resultados práticos de diferentes formas de aplicação e abordagens de simulação, projetos e caracterização no âmbito da engenharia e aplicação de tecnologia.

Tecnologia e pesquisa de base são os pilares do desenvolvimento tecnológico e da inovação. Uma visão ampla destes temas é portanda fundamental. É esta amplitude de áreas e temas que procuramos reunir neste livro.

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.

Optamos pela divisão da obra em dois volumes, como forma de organização e praticidade a você leitor. Aos autores, agradecemos pela confiança e espírito de parceria.

Boa leitura

João Dallamuta

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO E QUALIDADE DO BIOGÁS	
Carla Caroline Carvalho Poças Arlison Darlison Lima Leal Aroldo José Teixeira de Souza Filho João Areis Ferreira Barbosa Junior	
<b>DOI 10.22533/at.ed.5521930051</b>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>6</b>
ANÁLISE DO COMPORTAMENTO FÍSICO-QUÍMICO DE ROCHAS CARBONÁTICAS QUANDO SUBMETIDAS A INJEÇÃO DE CO <sub>2</sub> SUPERCRÍTICO	
Deodório Barbosa de Souza Katia Botelho Torres Galindo Analice França Lima Amorim Cecília Maria Mota Silva Lins Leonardo José do Nascimento Guimarães	
<b>DOI 10.22533/at.ed.5521930052</b>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>17</b>
ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO DO POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE PROVENIENTE DO PROCESSO DE RECICLAGEM MECÂNICA E DO POLIESTIRENO PROVENIENTE DA DEGASAGEM DO POLIESTIRENO EXPANDIDO	
Fabiula Danielli Bastos de Sousa Thiago Czermainski Gonçalves Alves Matheus Alves Rodrigues	
<b>DOI 10.22533/at.ed.5521930053</b>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>31</b>
ASSOCIAÇÃO DA FILTRAÇÃO DIRETA E USO DE COAGULANTES NATURAIS E QUÍMICOS NO TRATAMENTO DE ÁGUA DE ABASTECIMENTO	
Edilaine Regina Pereira Dandley Vizibelli Thaís Ribeiro Fellipe Jhordã Ladeia Janz José Euclides Stipp Paterniani	
<b>DOI 10.22533/at.ed.5521930054</b>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>38</b>
AUTOMATIZAÇÃO DE BRAÇO ROBÓTICO PARA COLETA EM CORPOS HÍDRICOS COM CONTAMINANTES NOCIVOS A SAÚDE HUMANA	
Louise Aimeé Reis Guimarães Jussiléa Gurjão de Figueiredo Ylan Dahan Benoliel Silva	
<b>DOI 10.22533/at.ed.5521930055</b>	

**CAPÍTULO 6 ..... 47**

AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA ESTRUTURAL DE PÓRTICOS PLANOS DE AÇO PROJETADOS COM ANÁLISE AVANÇADA

Danilo Luiz Santana Mapa  
Marcílio Sousa da Rocha Freitas  
Ricardo Azoubel da Mota Silveira

**DOI 10.22533/at.ed.5521930056**

**CAPÍTULO 7 ..... 62**

AVALIAÇÃO DA VAZÃO DE ASPERSORES SUBMETIDOS A DIFERENTES PRESSÕES

Anderson Crestani Pereira  
Adroaldo Dias Robaina  
Marcia Xavier Peiter  
Bruna Dalcin Pimenta  
Jardel Henrique Kirchner  
Wellington Mezzomo  
Marcos Vinicius Loregian  
Jhosefe Bruning  
Luis Humberto Bahú Ben

**DOI 10.22533/at.ed.5521930057**

**CAPÍTULO 8 ..... 70**

AVALIAÇÃO DO BINÔMIO TEMPO-TEMPERATURA DE REFEIÇÕES SERVIDAS EM RESTAURANTES *SELF-SERVICE* DE PICOS-PI

Nara Vanessa dos Anjos Barros  
Mateus da Conceição Araújo  
Adolfo Pinheiro de Oliveira  
Iraildo Francisco Soares  
Ennya Cristina Pereira dos Santos Duarte  
Rodrigo Barbosa Monteiro Cavalcante

**DOI 10.22533/at.ed.5521930058**

**CAPÍTULO 9 ..... 77**

AVALIAÇÃO DO EFEITO DE ANTIOXIDANTES NATURAIS NA ESTABILIDADE OXIDATIVA DO BIODIESEL

Ingrid Rocha Teixeira  
Jander Teixeira Peneluc  
Matheus Andrade Almeida  
Selmo Queiroz Almeida

**DOI 10.22533/at.ed.5521930059**

**CAPÍTULO 10 ..... 86**

AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE SEVERIDADE DE SECA DE PALMER (PDSI) PARA O MUNICÍPIO DE CRUZ ALTA/RS

Suélen Cristiane Riemer da Silveira  
Claudia Fernanda Almeida Teixeira-Gandra  
Rita de Cássia Fraga Damé  
Marcia Aparecida Simonete  
Emanuele Baifus Manke  
Maria Clotilde Carré Chagas Neta  
Henrique Michaelis Bergmann

**DOI 10.22533/at.ed.55219300510**

**CAPÍTULO 11 ..... 93**

**AVALIAÇÃO DO SUCO MISTO DE ACEROLA COM MANJERICÃO**

Michele Alves de Lima  
Elynne Kryslen do Carmo Barros  
Clélia de Moura Fé Campos  
Marilene Magalhães de Brito  
Maria Márcia Dantas de Sousa  
Karine Aleixes Barbosa de Oliveira  
Thamires Mendonça de Carvalho  
Robson Alves da Silva

**DOI 10.22533/at.ed.55219300511**

**CAPÍTULO 12 ..... 102**

**COLORIMETRIA APLICADA A ESPÉCIES FLORESTAIS EM MATO GROSSO**

Edilene Silva Ribeiro  
Joaquim Carlos Gonzalez  
William Cardoso Lima  
Luzia Elaine Domingues Pimenta Vargas  
Roberta Santos Souza

**DOI 10.22533/at.ed.55219300512**

**CAPÍTULO 13 ..... 114**

**COMPORTAMENTO DA ALFACE COM DISTINTAS DOSAGENS DE ESTERCO CAPRINO EM DIFERENTES REGIÕES**

Thaís Rayane Gomes da Silva  
Marcelo Rodrigues Barbosa Júnior  
Cinara Bernardo da Silva  
Luan Wamberg dos Santos  
Márcio Aurélio Lins dos Santos

**DOI 10.22533/at.ed.55219300513**

**CAPÍTULO 14 ..... 122**

**COMPORTAMENTO DA ALTURA DO CACAUEIRO SOB DIFERENTES QUANTIDADES DE ÁGUA E NITROGÊNIO**

Roger Luiz Da Silva Almeida  
Roger Luiz Da Silva Almeida Filho  
Gustavo Victor De Melo Araújo Almeida

**DOI 10.22533/at.ed.55219300514**

**CAPÍTULO 15 ..... 127**

**CORRELAÇÕES ENTRE AS TEORIAS DE EULER-BERNOULLI E DE SHI-VOYIADJIS PARA VIGAS: UMA ABORDAGEM TEÓRICA E NUMÉRICA**

Hilton Marques Souza Santana  
Fabio Carlos da Rocha

**DOI 10.22533/at.ed.55219300515**

<b>CAPÍTULO 16</b> .....	<b>144</b>
EFICIÊNCIA DOS PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS NA REDUÇÃO DA DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO (DQO)	
Júlia Buffon Laura Cerezolli De Carli Gabriela Madella Kranz Maria Luiza Danielli Zanandréa Murilo Cesar Costelli	
<b>DOI 10.22533/at.ed.55219300516</b>	
<b>CAPÍTULO 17</b> .....	<b>151</b>
ESTUDO DA REAÇÃO DE ELETRO-OXIDAÇÃO DE GLICEROL EM MEIO ALCALINO	
Micaeli Caldas Gloria Elson Almeida de Souza Paulo José de Sousa Maia	
<b>DOI 10.22533/at.ed.55219300517</b>	
<b>CAPÍTULO 18</b> .....	<b>167</b>
ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICO ECONÔMICA DO BIOGÁS DA SUINOCULTURA PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	
Arilson Darlison Lima Leal Carla Caroline Carvalho Poças Aroldo José Teixeira de Souza Filho João Areis Ferreira Barbosa Junior	
<b>DOI 10.22533/at.ed.55219300518</b>	
<b>SOBRE O ORGANIZADOR</b> .....	<b>172</b>

## ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO E QUALIDADE DO BIOGÁS

### **Carla Caroline Carvalho Poças**

Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde,  
Estudante de Iniciação Científica.  
Rio Verde – Goiás

### **Arilson Darlison Lima Leal**

Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde,  
Estudante de Iniciação Científica.  
Rio Verde – Goiás

### **Aroldo José Teixeira de Souza Filho**

Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde,  
Mestrando  
Rio Verde – Goiás

### **João Areis Ferreira Barbosa Junior**

Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde,  
Doutorado em Engenharia Elétrica  
Rio Verde – Goiás

**RESUMO:** O biogás produzido em biodigestores de suinocultura apresenta grande potencial de aproveitamento energético, além de ser fundamental na redução dos impactos ambientais causados por dejetos de suínos. O biogás é composto por uma parcela considerável de metano, tornando-o eficiente para produção de energia elétrica, por possuir elevado poder de queima. Entretanto, se dispersado no ambiente sem tratamento, pode causar grandes danos ambientais. A cidade de Rio Verde, em Goiás, possui grande potencial de uso do biogás para produção de energia,

devido a cadeia agroindustrial de produção de suínos. Nesta, os biodigestores são obrigatórios para o descarte dos resíduos de suínos. Entretanto, pouco se sabe sobre a qualidade do biogás, principalmente quanto ao teor de metano, essencial ao processo de queima. Portanto, esse trabalho avaliou a qualidade do biogás produzido em uma granja da região e seu potencial de queima para produção de energia elétrica.

**PALAVRAS-CHAVE:** Produção de Energia; Suinocultura; Metano.

**ABSTRACT:** The biogas produced in pig farming biodigesters presents great potential for energy utilization, besides being fundamental in reducing the environmental impacts caused by swine manure. Biogas is composed of a considerable portion of methane, making it efficient for the production of electricity, because it has high calorific value. However, if dispersed in the environment without treatment, it can cause great environmental damages. The city of Rio Verde, in Goiás, has great potential for use of biogas for energy production, due to the agroindustrial chain of production of pigs. In this, the biodigesters are required for the disposal of the residues of pigs. However, little is known about the quality of biogas, especially as regards the methane content, which is essential to the burning process. Therefore, this work evaluated

the quality of the biogas produced in a pig farm in the region and its burning potential for the production of electric energy.

**KEYWORDS:** Production of energy; Swine breeding; Methane.

## 1 | INTRODUÇÃO

O Brasil possui grande relevância na agropecuária mundial, se destacando tanto na produção agrícola quanto pecuária, podendo citar nesta última bovinocultura, avicultura e suinocultura. Neste contexto, segundo IBGE (2014), a cidade de Rio Verde se destaca na produção de grãos e por ser a maior produtora de carne suína no país. Apesar da importância no meio econômico, deve-se ressaltar as preocupações com as questões ambientais, devido ao grande volume de dejetos (fezes e urina) produzidos por essa cultura (PICA; TONIELO, 2015). Nesse contexto, os biodigestores vêm ganhando cada vez mais espaço por utilizar a biomassa, no caso os dejetos dos suínos, para convertê-la em compostos menos impactantes ao meio ambiente, conhecidos como biogás e biofertilizante.

A biomassa presente nos dejetos suínos é degradada por digestão anaeróbica, originando o biogás e o biofertilizante como produto (COELHO et al., 2006). O biogás contém uma parcela de metano em sua composição, existindo basicamente dois caminhos para esse biogás produzido. Se o metano ( $\text{CH}_4$ ) for disperso no ambiente sem nenhum tratamento, pode ser altamente prejudicial ao mesmo. Entretanto, se este for utilizado como fonte de energia renovável, pode trazer diversos benefícios (SCHIRMER et al., 2015). Além do metano, o biogás também traz em sua composição gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) e amônia ( $\text{NH}_3$ ).

A região centro-oeste do Brasil é escassa em informações acerca da produção de energia elétrica por meio do biogás, dificultando a difusão dessa tecnologia entre os produtores da região. Assim, o presente trabalho verificou a composição do biogás produzido por uma granja suinícola, próxima a cidade de Rio Verde. Essa análise da composição do biogás é extremamente importante para fornecer informações sobre o poder calorífico do biogás produzido. Para isso, o presente projeto utilizou uma técnica desenvolvida pela Embrapa Aves e Suínos em parceria com a empresa Alfakit, chamada “Kit de Análise de Biogás”.

## 2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização das análises, a coleta do biogás é feita utilizando o saco amostrador, chamado bag. A primeira análise feita é de amônia. Para isso, adiciona-se água deionizada na cubeta plástica. Em seguida, adiciona-se 2 gotas da solução Pré-Tratamento 1. Com a seringa azul, são coletados 5 ml da solução e transferidos para a seringa transparente de amônia. Com a solução na seringa transparente, deve-se conectá-la ao bag e transferir 50 ml para a seringa. Ainda com a seringa conectada

a mangueira, deve-se agitar o conjunto por dois minutos para que todo líquido entre em contato com o gás. Em seguida, a solução é transferida para a cubeta de vidro. Na cubeta, são adicionadas 3 gotas da solução Amônia Indotest 1, 3 gotas da solução Amônia Indotest 2 e 3 gotas da solução Amônia Indotest 3. Aguarda-se 10 minutos para o desenvolvimento da cor da amostra e sua análise colorimétrica. Segundo a cor indicada é que será obtida a concentração de amônia, em ppmV (partes por milhão em volume).

Em seguida, a análise feita é de gás sulfídrico. Para isso, o mesmo procedimento é realizado, entretanto nesse momento usa-se os reagentes indicados para gás sulfídrico. Após a coleta do biogás e a mistura com a solução preparada, a solução deve ser transferida para a cubeta de vidro. Na cubeta de vidro, devem ser adicionados os reagentes indicados. Após 10 minutos a cor desenvolvida deve ser comparada com a da tabela indicada.

Para a análise de CO<sub>2</sub> e metano, são coletados 5 ml da solução Pré-Tratamento 2, com a seringa azul. Essa solução é transferida para a seringa plástica no suporte. Depois o bag deve ser conectado ao suporte e são transferidos 20 ml de biogás para a seringa de vidro. O gás da seringa de vidro é transferido para a seringa plástica e todo conjunto é agitado por 2 minutos. Com o suporte na posição vertical, o gás que está na seringa plástica deve ser transferido para a seringa de vidro. Ao término, observa-se na lateral do suporte a porcentagem de CO<sub>2</sub> e de metano. Na figura 1 pode-se observar todos os componentes presentes no Kit de Análise, citados na metodologia.

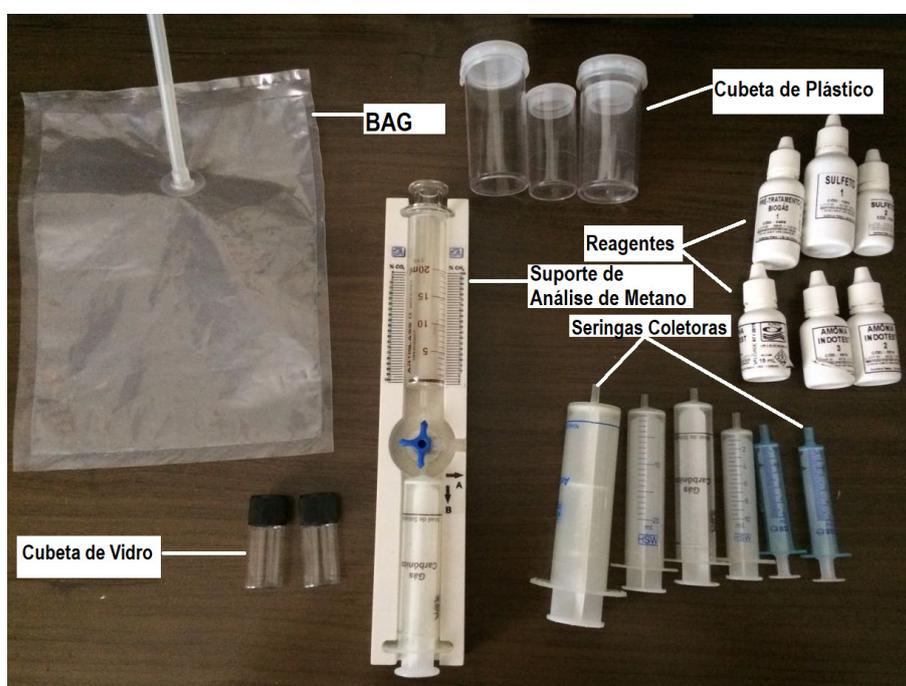


Figura 1- Elementos presentes no Kit de Análise de Biogás

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram realizadas 7 coletas e análises durante o projeto. Os resultados obtidos

estão demonstrados na tabela 1. Na figura 2 também pode ser observado um resumo das concentrações de metano obtidas nas análises.

Conforme se pode observar, os percentuais de dióxido de carbono e metano encontrados nas três primeiras coletas realizadas em diferentes dias ficaram bastante próximos. O mesmo ocorreu para a quantidade de amônia e gás sulfídrico encontrados na primeira e terceira coleta. Quanto às concentrações de amônia e gás sulfídrico encontradas na segunda coleta, estas se mostraram discrepante, provavelmente devido a não utilização do bag para a coleta do biogás, como forma de testar a importância do bag nas coletas. Isso demonstra a importância da obediência sem exceções da metodologia escolhida. No quarto e quinto dia de coletas, observa-se que a concentração de amônia se manteve igual, e no sexto e sétimo dia houve uma discrepância. As concentrações de gás sulfídrico se mantiveram constantes no quarto, quinto e sexto dia de coletas, e ficou diferente no sétimo dia.

Segundo Tobias (2002), as características físicoquímicas dos dejetos suínos apresentam relação direta com o manejo e os aspectos alimentares aplicados aos animais. Dessa forma, a composição dos dejetos vai variar segundo a quantidade de água usada nas instalações, tipo de alimento, faixa etária dos animais, entre outros. Com a variação dos dejetos, há também a variação na composição do biogás, que explica tais diferenças encontradas nas amostras.

Estes resultados alcançados, a partir da análise qualitativa realizada através de teste colorimétrico, demonstram que o biogás produzido nesta propriedade apresenta índices satisfatórios para aproveitamento energético. Isso pois, a ampla maioria dos grupos motor-gerador utilizados para queima de biogás, trabalham com uma regulagem para receber um biogás com percentual de metano na faixa de 60 a 65%. Naturalmente, tais resultados poderiam ser ainda melhores, caso o proprietário utilizasse alguma técnica para purificação do biogás.

Dia 11/11/17		Dia 18/11/17		Dia 16/12/17		Dia 03/03/18	
Gás	Concentração	Gás	Concentração	Gás	Concentração	Gás	Concentração
Amônia	45 ppmV	Amônia	350 ppmV	Amônia	45 ppmV	Amônia	45 ppmV
Gás sulfídrico	610 ppmV	Gás sulfídrico	460 ppmV	Gás sulfídrico	610 ppmV	Gás sulfídrico	480 ppmV
CO2	23%	CO2	25%	CO2	27%	CO2	26%
Metano	77%	Metano	75%	Metano	73%	Metano	74%
Dia 28/03/18		Dia 14/04/18		Dia 25/04/18			
Gás	Concentração	Gás	Concentração	Gás	Concentração		
Amônia	45 ppmV	Amônia	525 ppmV	Amônia	170 ppmV		
Gás sulfídrico	460 ppmV	Gás sulfídrico	460 ppmV	Gás sulfídrico	610 ppmV		
CO2	42%	CO2	45%	CO2	32%		
Metano	58%	Metano	55%	Metano	68%		

Tabela 1 – Resultados obtidos nas análises

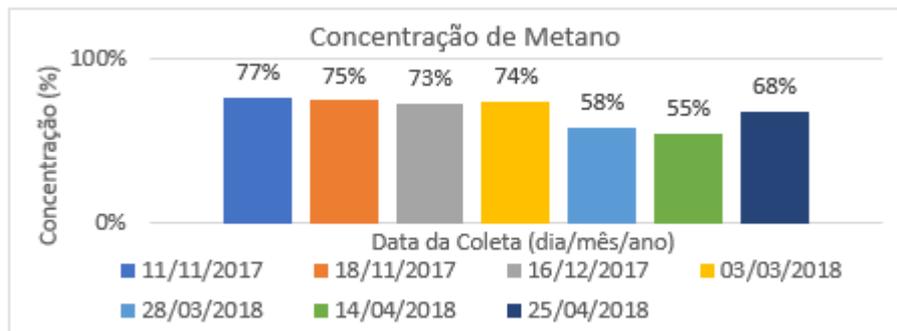


Figura 2- Resumo das concentrações de metano

## 4 | CONCLUSÃO

Apesar do custo considerável de aquisição e instalação do biodigestor, este é essencial no tratamento dos dejetos de suínos, visto que os dejetos são altamente poluidores. Entretanto, existe uma escassez de informações técnicas e profissionais capacitados para atuar neste tema, tornando difícil a disseminação da tecnologia. Neste sentido, os resultados obtidos possibilitaram o conhecimento da qualidade do biogás produzido por biodigestores, que pode ser utilizado para produção de energia elétrica, como na propriedade rural avaliada.

Deve-se destacar os agradecimentos ao IF Goiano, pelo apoio financeiro através da bolsa PIBIT de Iniciação Científica, recursos e transporte para execução do projeto e ao proprietário Ivan Klein (Fazenda Talhado).

## REFERÊNCIAS

COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; SILVA, O. C.; PECORA, V.; ABREU, F. C. **Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto**. Proceedings of the 6. Encontro de Energia no Meio Rural, 2006. IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Produção da Pecuária Municipal, 2014.

PICA, C. Q.; TONIELO, M. L. **SISTEMAS COOPERADOS DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS E GERAÇÃO DE ENERGIA: ANÁLISE DE CASOS E MODELAGEM DE NEGÓCIO DE PROJETO EM SANTA CATARINA**. Gestão & Sustentabilidade Ambiental, Florianópolis, n. esp, p. 330-346, 2015. Disponível em: <[http://www.portaldeperiodicos.unisul.br/index.php/gestao\\_ambiental/article/view/3370](http://www.portaldeperiodicos.unisul.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/3370)>. Acesso em: 30 jul. 2018.

SCHIRMER, W. N.; CROVADOR, M. I. C.; STEMMLER, A. S.; JUCÁ, J. F. T. **AVALIAÇÃO DA GERAÇÃO DE GÁS SULFÍDRICO NO BIOGÁS GERADO A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**. Ciência & Tecnologia: FATEC-JB, Jaboticabal, v. 7, n. 1, p.1-15, 2015.

TOBIAS, A. C. T. **Tratamento de Resíduos da Suinocultura: Uso de Reatores Anaeróbios Seqüenciais Seguido de Leitões Cultivados**. 2002. 125 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2002. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/257294>>. Acesso em: 30 jul. 2018.

## ANÁLISE DO COMPORTAMENTO FÍSICO-QUÍMICO DE ROCHAS CARBONÁTICAS QUANDO SUBMETIDAS A INJEÇÃO DE CO<sub>2</sub> SUPERCRÍTICO

### **Deodório Barbosa de Souza**

Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil.

### **Katia Botelho Torres Galindo**

Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil.

### **Analice França Lima Amorim**

Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil.

### **Cecília Maria Mota Silva Lins**

Universidade Federal Rural de Pernambuco, Cabo de Santo Agostinho, Brasil.

### **Leonardo José do Nascimento Guimarães**

Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil.

**RESUMO:** Diversas tecnologias estão sendo desenvolvidas para reduzir as emissões de dióxido de carbono, um dos gases apontados como causadores do aquecimento global e assim mitigar as mudanças climáticas causadas por elas, como exemplo o armazenamento do CO<sub>2</sub> em formações geológicas. Esta pesquisa objetiva avaliar, através de experimentos e modelos numéricos, as modificações físicas e químicas ocorridas no meio poroso das rochas carbonáticas devido à exposição ao CO<sub>2</sub>. Foram realizados ensaios de exposição ao CO<sub>2</sub> supercrítico utilizando rochas carbonáticas em um reator de alta pressão, com temperatura e

pressão controlados. A partir dos ensaios foi possível verificar através das análises que a exposição ao CO<sub>2</sub> supercrítico ocasionou uma possível precipitação dos minerais de calcita e dolomita nas rochas, afetando a porosidade das amostras. Na simulação numérica foi possível comparar com resultados experimentais, e observar as alterações nas amostras que podem afetar diretamente a capacidade de armazenamento geológico de CO<sub>2</sub>.

**PALAVRAS-CHAVE:** Exposição ao CO<sub>2</sub>, Interação Rocha Fluido, Rocha Carbonática.

**ABSTRACT:** Several technologies are being developed to reduce carbon dioxide emissions, one of the gases targeted to cause global warming and thus mitigate climate change caused by them, such as the storage of CO<sub>2</sub> in geological formations. This research aims to evaluate, through experiments and numerical models, the physical and chemical changes occurring in the porous medium of carbonate rocks due to CO<sub>2</sub> exposure. Supercritical CO<sub>2</sub> exposure tests were carried out using carbonate rocks in a high pressure reactor with controlled temperature and pressure. From the tests it was possible to verify through the analysis that the exposure to the supercritical CO<sub>2</sub> caused a possible precipitation of the calcite and dolomite minerals in the rocks, affecting the porosity of the samples. In the numerical simulation it was

possible to compare with experimental results, and observe the changes in the samples that can directly affect the geological storage capacity of CO<sub>2</sub>.

## 1 | INTRODUÇÃO

O cenário mundial de produção de energia tem sofrido transformações devido às pressões exercidas pela necessidade de preservação das condições ambientais, uma vez que, as principais tecnologias utilizadas atualmente para a produção de energia têm como consequência a emissão de gases de efeito estufa (GEE). Adicionalmente, com a instituição da Política Nacional sobre Mudanças do Clima (Lei Nº 12.817 / 2009), que consiste na redução das emissões antrópicas de gases de efeito estufa em relação às suas diferentes fontes, as empresas precisaram estabelecer objetivos e metas para a redução de emissões de GEE, sem restringir a expansão produtiva. Como um exemplo nacional tem-se a PETROBRAS, que inicialmente em 2008 evitou a emissão de 680 mil toneladas de CO<sub>2</sub> e através da utilização de tecnologias limpas e estratégias de armazenamento geológico de CO<sub>2</sub>, busca continuar reduzindo gradativamente a emissão de CO<sub>2</sub> para a atmosfera. Com a descoberta das camadas do pré-sal, novas técnicas para a redução das emissões de CO<sub>2</sub> estão sendo desenvolvidas, visto que a exploração e produção de petróleo nestes reservatórios proporcionarão a emissão anual de milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, devido à ocorrência de concentração de 3 a 4 vezes a mais de CO<sub>2</sub> nos campos do pós-sal, em relação aos reservatórios explorados atualmente (PETROBRÁS, 2008).

A extração de petróleo em reservatórios profundos tem a previsão de grande produção (direta ou indireta) de CO<sub>2</sub>, que não deveria ser emitido para a atmosfera por força da política e normas ambientais aplicadas nas empresas de gerenciamento de reservatório. Assim, existe a necessidade de estudar e desenvolver novas tecnologias e atividades para a redução de emissões desse gás, tais como o uso mais eficiente da energia, substituição dos combustíveis fósseis por outros com menor conteúdo de carbono, utilização de soluções energéticas que façam o emprego de fontes de energia renováveis e até o armazenamento do CO<sub>2</sub> em formações geológicas (IPCC, 2005).

Como mencionado anteriormente, o armazenamento geológico de CO<sub>2</sub> é uma das alternativas para diminuição da emissão desses gases na atmosfera. Porém, o armazenamento deste gás em um reservatório pode causar diferentes reações geoquímicas, tais como: precipitação, dissolução, cimentação entre outros fenômenos capazes de influenciar a permeabilidade e porosidade da rocha, aumentando ou diminuindo sua capacidade de reter CO<sub>2</sub>.

Todos os processos envolvidos dependem principalmente da reatividade do CO<sub>2</sub> nas condições de temperatura e pressão às quais está submetido. Em condições normais de temperatura e pressão, o CO<sub>2</sub> apresenta densidade de 1.872kg/m<sup>3</sup>, sendo seu ponto crítico na temperatura de 31,1°C e pressão de 72,83 atm. Nas condições

acima do ponto crítico, o CO<sub>2</sub> é considerado um fluido supercrítico, ou seja, apresenta densidade de um líquido e volume de um gás, porém, é bem mais reativo que nas condições normais (LINS, et al 2012).

## 2 | METODOLOGIA

### 2.1 Coleta, caracterização e preparação das amostras

As amostras de rochas carbonáticas foram coletadas a partir de afloramentos (exposições naturais) na região de Pontas de Pedras, Pernambuco (Formação Gramame), e de Tambaba na Paraíba (Formação Tambaba). Para a coleta das amostras foram realizados os seguintes procedimentos:

(i) Primeiramente foi realizado a coleta de blocos de rochas nas regiões selecionadas, as amostras de rochas menos afetadas pelo intemperismo e pouco afetada por veios e fraturas, para melhor qualidade e melhor repetitividade nos ensaios.

(ii) Em seguida foram retirados plugues dos blocos de rochas coletados, na forma de cilindros com dimensões de 4 cm de diâmetro e 5 cm de altura (Figura 1). Algumas amostras foram utilizadas para a execução de lâminas delgadas e outras foram utilizadas para a execução dos ensaios com reator de alta pressão. A preparação das amostras, corte e extração dos corpos de prova foram realizadas nos laboratórios de laminação de rochas e de Catodoluminescência do DGEO-UFPE.



Figura 1. Preparação das amostras e extração dos plugues para os ensaios. a) Corte das amostras, b, c, extração de plugue com mandril e serra copo, e d) plugs extraídos

## 2.2 Ensaio de exposição de CO<sub>2</sub> supercrítico com reator de alta pressão

Para realizar os ensaios de exposição de CO<sub>2</sub> foi necessário instrumentar, adaptar e montar uma célula de aço inox para suportar altas pressões e temperaturas (Figura 2).

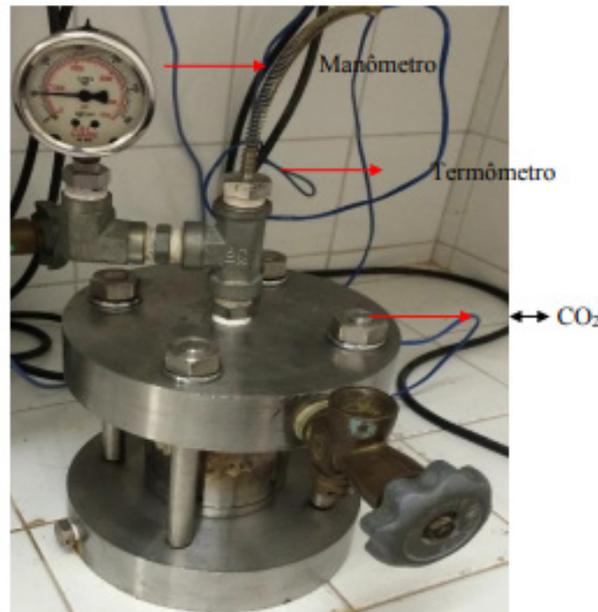


Figura 2. Reator de alta pressão e temperatura.

Os plugs com peso aproximado de 100g, foram utilizados para realização destes ensaios. O tempo de duração dos experimentos foi de 40 dias, objetivando acompanhar a frente de dissolução e/ou precipitação no meio poroso ao longo do tempo.

## 2.3 Análise de Petrografia e Catodoluminescência

As análises de Petrografia e Catodoluminescência foram realizadas no laboratório de Catodoluminescência da Universidade Federal de Pernambuco. Para a análise, foi utilizado um microscópio de luz transmitida normal e o equipamento de catodoluminescência, que apresenta especial aplicação para estudo de rochas carbonáticas (Figura 3). O estudo petrográfico foi realizado em lâminas delgadas, tanto em microscópio petrográfico comum, como em equipamento de catodoluminescência.



Figura 3. Microscópio Petrográfico.

Durante a análise petrográfica foi realizada uma estimativa visual da porosidade das rochas analisadas, da rocha original e da rocha que passou pelo ensaio de exposição.

## 2.4 Procedimento Numérico

Para a simulação numérica, foram realizados estudos numéricos visando avaliar as modificações físico-químicas e mineralógicas provocadas pela interação entre rochas carbonáticas e um fluido reativo resultante da reação entre água destilada e  $\text{CO}_2$  em estado supercrítico. Com base no acoplamento THG (Termo-Hidro-Geoquímico) dos experimentos através do PHREEQC (PARKHURST e APPELO, 1999).

## 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Análise do ensaio de injeção de $\text{CO}_2$ com reator de alta pressão.

Os resultados a seguir correspondem a rocha original coletada nas formações de Tambaba e Gramame, que correspondem a uma rocha com matriz dolomitizada defeito a processos diagenéticos, com um relativo conteúdo de minerais siliciclásticos, composto por cristais de quartzo e feldspatos potássicos.

Na Figura 4 mostra as amostras no reator de alta pressão antes e após ensaio. Após o ensaio, as amostras tanto da Formação Tambaba quanto da Formação Gramame, apresentaram evidência de formação de óxidos, devido a uma possível oxidação dos minerais de ferro ou ferro livre presente na solução.



Figura 4. Amostras antes e após exposição com  $\text{CO}_2$ .

### 3.2 Análise petrográfica e de Catodoluminescência das amostras do ensaio de exposição de $\text{CO}_2$

#### 3.2.1 Resultados antes e após o ensaio de exposição de $\text{CO}_2$ da Formação Tambaba

A descrição petrográfica mostra que as rochas carbonáticas da Formação

Tambaba são compostas calcita e dolomita, além disso ocorre conteúdo de minerais siliciclásticos na forma de finos cristais de quartzo e feldspatos. Os cristais de calcita são cristais romboédricos com dimensões que chegam a atingir  $20\mu\text{m}$ , formando cimento esparítico. A matriz espática mostra sinais evidentes de recristalização que originou a formação de calcita blocosa, e de cristais de dolomita.

A Figura 5 apresenta uma fotomicrografia a nicóis paralelos dos calcários dolomíticos da Formação Tambaba. Pode-se observar um cristal de calcita recristalizada, indicada pela seta vermelha e cristais de dolomita rodeados por cristais de calcita esparítica indicados pelas setas pretas. A imagem também mostra porções oxidadas da matriz com coloração marrom e preto.



Figura 5. Fotomicrografia das análises petrográficas a nicóis paralelos da Formação Tambaba.

A figura 6 apresenta os resultados da análise petrográfica para as amostras da Formação Tamababa submetidas aos dois ensaios realizados com duração de 40 dias de exposição do gás.

A investigação dos aspectos petrofísicos, a observação realizada com base nas lâminas petrográficas sugere que os ensaios resultaram na precipitação de calcita, possivelmente a partir da solução reativa. Os cristais de calcita neo-formados formaram-se ao redor de cristais já existentes gerando um crescimento secundário. Os cristais neo-formados iniciaram o crescimento a partir de pequenas projeções romboédricas com diferentes orientações.

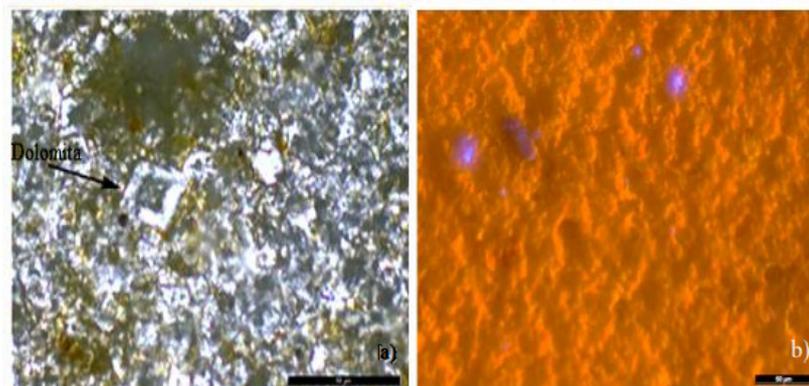


Figura 6. Fotomicrografias e Catodoluminiscência da leitura das lâminas petrográficas das amostras da Formação Tambaba após a realização dos ensaios. A) matriz formada por bioesprito, também apresentando cristais de dolomita, indicado por seta preta. As áreas escuras indicam a ocorrência de sulfeto (pirita), e de oxidação. B) A matriz original, composta por calcita bioespática apresenta coloração laranja a vermelho claro. Os finos cristais de feldspato apresentam coloração azul clara.

O estudo petrográfico, embora apresente potencial qualitativo, permitiu concluir que ocorreu um aumento estimado da porosidade em cerca de 5% em relação as amostras da rocha original não ensaiada. Isto sugere que houve a estabilização do sistema após o processo difusivo, contribuindo para uma equalização da porosidade, pH e das interações rocha-fluido.

### 3.2.2 Resultados antes e após ensaio de exposição de CO<sub>2</sub> da Formação Gramame

A análise petrográfica da amostra da Formação Gramame, mostram que a maior parte da matriz da rocha é de calcita pouco magnesianas com áreas de coloração mais escura, marrom ou vermelho, indicando a formação de cristais de dolomita. Algumas áreas mostram que houve intensa substituição da calcita por dolomita. Finos cristais de quartzo e feldspato também ocorrem na matriz calcítica.

Os cristais esbranquiçados apresentados na figura 7 refletem o grau de recristalização que a rocha sofreu durante sua diagênese. Os cristais de dolomita apresentam-se euédricos, rômnicos, com núcleos escuros e bordas claras inferindo as variações nas condições de pressão, temperatura e química nas quais se formaram. Pode-se também observar a oxidação local em torno de alguns cristais na matriz recristalizada.

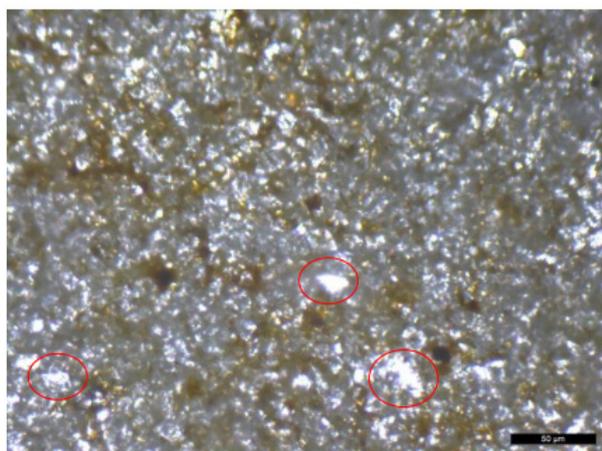


Figura 7. Fotomicrografia da análise petrográfica mostrando uma visão geral de uma seção delgada dos carbonatos da Formação Gramame.

Na Figura 8 apresenta a imagem obtida através da técnica de catodoluminescência para a amostra da Formação Gramame. Os cristais de quartzo e feldspato, apresentam formas anédricas e subédricas, com fortes cores azuis no

caso do feldspato potássico, e marrom ou escuro no caso do quartzo em geral; Estes minerais encontram-se dispersos na matriz esparítico. Os cristais azuis representam grãos de feldspato. A carbonática é marcada pelos cristais de coloração laranja escura. Esta cor indica uma alta concentração de óxidos nos constituintes essenciais da rocha, possivelmente ankerita. Ocorre um cimento mais novo de cor laranja brilhante, calcita rica em Mn. Os cristais de dolomita exibem coloração vermelho escuro a marrom, e clara conformação rombica.

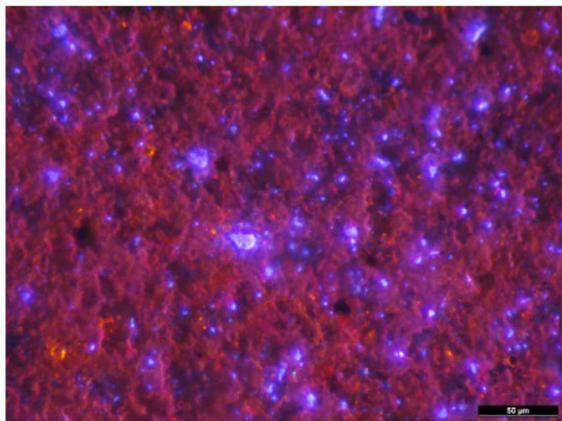


Figura 8. Catodoluminescência mostrando a imagem geral dos calcários dolomíticos da Formação Gramame.

Após a exposição com gás é possível observar que na Figura 9, obtida com a técnica de Catodoluminescência, é possível observar um grande cristal de dolomita que apresenta crescimento secundário de calcita, que aparece com coloração laranja brilhante. É possível que neste caso houve o processo de de-dolomitização, durante a diagênese tardia, que implica na substituição do cimento de dolomita por cimento de calcita. A região de zoneamento concêntrica também apresenta uma alternância entre as luminescências, com brilhos de maior e menor intensidade, sendo que esta variação refere-se à concentração diferenciada entre  $Mn^{2+}$  e  $Fe^{2+}$ . A seta amarela indica uma zona não-luminescente que sugere a ocorrência de dolomita rica em ferro (ankerita), conforme também identificado através dos difratogramas. As setas vermelhas apontam alguns cristais de dolomita espalhados no cimento esparítico (marrom escuro a laranja escuro).

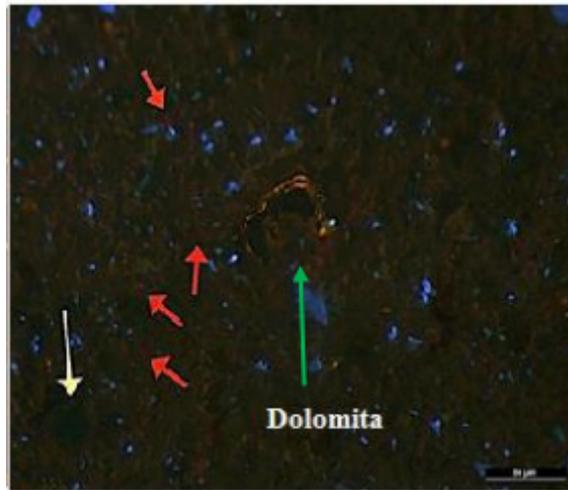


Figura 9. Fotomicrografias analisadas para as amostras da Formação Gramame após os ensaios de 40 dias obtida com a técnica de Catodoluminescência.

Foi possível verificar a precipitação de calcita, pois esses novos minerais precipitados e cristalizados ao redor de cristais já existentes geraram um crescimento secundário ou um cimento esparítico. Os novos cristais começaram a ser nucleados, preenchendo os espaços intergranulares, podendo ser cristalizados ao redor de cristais pré-existentes.

A porosidade pode variar localmente na amostra, sendo necessário uma avaliação cautelosa para que se possa definir valores efetivos. A investigação petrográfica das amostras que passaram pelo ensaio e 40 dias permitiu inferir que houve um aumento estimado de cerca de 12% em relação as amostras de rocha original não-ensaiada. Essa porosidade do tipo vugular foi observada a olho nu nos testemunhos, assim como na análise petrográfica das amostras ensaiadas. A porosidade vugular existe nessas amostras por conta dos efeitos da diagênese. Esse aumento parece muito grande para uma rocha que apresenta baixa permeabilidade.

### 3.3 Análise dos resultados de exposição de CO<sub>2</sub> no PHREEQC

Foi estipulado dados de entrada de composição de cada amostra, e foi possível observar uma redução da molalidade dos componentes em análise (Ca+2, Mg+2, HCO<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>), onde a concentração molal expressa o número de mols do soluto (rocha) existente por quilogramas de solvente (fluido reativo) sugerindo a ocorrência de dissolução e precipitação de minerais (Figura 10 a).

A Figura 10 b mostra os resultados da simulação da concentração dos minerais em solução durante o aquecimento. Como também observado nos resultados experimentais, nas Figuras 10 e 11 é possível avaliar uma redução no percentual de pirita (Disulfeto de Ferro – FeS<sub>2</sub>) mediante um processo oxidativo. A adição de mais água e oxigênio transforma o sulfato ferroso em ácido sulfúrico que mesmo em solução fraca constitui um reagente muito eficiente que age sobre outros compostos minerais. Logo, a oxidação da pirita se constitui para as reações subsequentes. Os fenômenos de

precipitação e dissolução da rocha após contato com o fluido reativo (ácido carbônico) sugerem processos de calcitização e dolomitização, onde a princípio a reação entre os carbonatos com os elementos de Calcio (Ca) tem uma maior facilitação, como vistos nos ensaios.

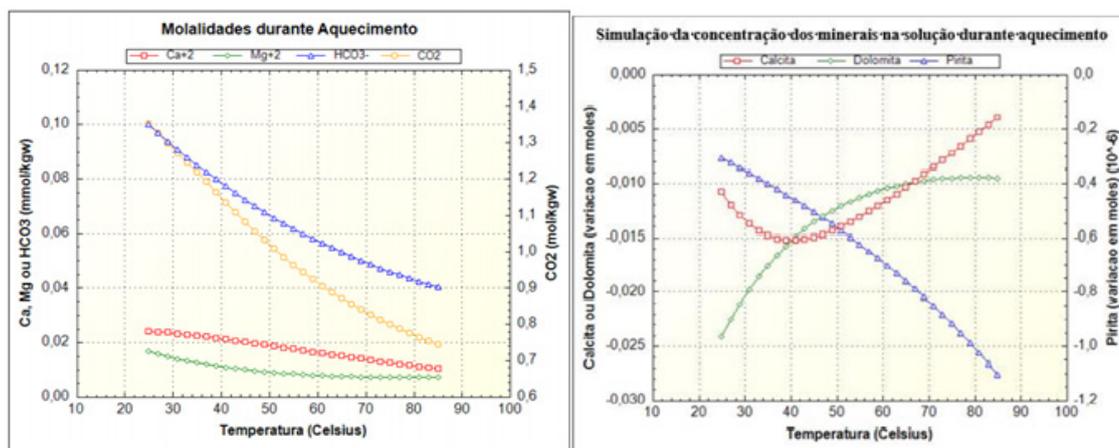


Figura 10. A) Simulação da molalidades durante aquecimento; b) Simulação da concentração dos minerais na solução durante aquecimento.

## 4 | CONCLUSÕES

Com o objetivo de analisar o comportamento de rochas carbonáticas sob exposição de CO<sub>2</sub> supercrítico, utilizou-se reatores de alta pressão com controle de temperatura e pressão.

Nas análises de petrografia e catodoluminescência, foi possível identificar que a interação rocha-fluido causou a dissolução parcial de minerais de carbonato através da acidificação da água contida nos poros em ambos os intervalos de tempo analisados. Mediante a precipitação e dissolução dos minerais, é sugerido a ocorrência de processos de calcitização e dolomitização, além de a estabilização do sistema mediante a redução da concentração de CO<sub>2</sub>, tornando o sistema novamente em condições de equilíbrio para o carbonato.

Os resultados das simulações numéricas obtidas pelo programa PHREEQC foram satisfatórias, uma vez que validou os resultados obtidos experimentalmente, sugerindo uma possível ocorrência de processos de calcitização, dolomitização e dedolomitização após o equilíbrio químico do sistema.

## REFERÊNCIAS

Appelo Caj, Postma D (2005). **Geochemistry, groundwater, and pollution** (2nd ed.). Balkema, Amsterdam p. 635. Ingold, T.S. e Miller, K.S. (1983). Drained Axisymmetric Loading of Reinforced Clay, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 109, p. 883-898.

IPCC (2005). **Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report. Carbon Dioxide Capture and Storage**: Summary for Policymakers and Technical Summary.

Lins, C.M.M.S., Melo, L.M.P., Oliveira, A.D., Firmo, A.L.B., Galindo, K.B.T. (2012). **Analysis of the**

**carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) injection on carbonate rocks.** Cientec. V4 (2): 84-91.

Parkhurst, D.L. Apello, C.A.J. 1999. *User's guide to PHREEQC (version 2) - A computer program for speciation, batch-reaction, onedimensional transport, and inverse geochemical calculations.* U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4259.

PETROBRÁS (2008). **Balço Social e Ambiental 2008.** Disponível em: Acessado em 26/01/2012.

## ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO DO POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE PROVENIENTE DO PROCESSO DE RECICLAGEM MECÂNICA E DO POLIESTIRENO PROVENIENTE DA DEGASAGEM DO POLIESTIRENO EXPANDIDO

**Fabiula Danielli Bastos de Sousa**

Universidade Federal de Pelotas, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Pelotas - RS

**Thiago Czermainski Gonçalves Alves**

Universidade Federal de Pelotas, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Pelotas - RS

**Matheus Alves Rodrigues**

Universidade Federal de Pelotas, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Pelotas - RS

**RESUMO:** Tendo em vista a imensa gama de aplicação e volume de consumo de polímeros em nossa sociedade e, conseqüentemente, a grande porção que é descartada de forma inadequada no meio ambiente gerando graves problemas ambientais, torna-se necessário investigar as rotas de reciclagem viáveis a cada material, a fim de aprimorá-las ou mesmo implementar produtos amigáveis ao meio ambiente, especialmente nos dias atuais. A nível molecular, os processos de reciclagem estudados para o poliestireno (degasagem em estufa aquecida do poliestireno expandido) e para o polietileno de alta densidade (reciclagem mecânica) causam modificações significativas como resultado dos processos degradativos sofridos por cada material, sendo de grande importância o conhecimento destes mecanismos para compreender a maneira com que ocorrem tais modificações e quais

suas conseqüências na estrutura química e propriedades finais dos polímeros reciclados. Como resultado, o profundo conhecimento das propriedades finais do polímero reciclado torna-se essencial para o seu reprocessamento na produção de novos bens de consumo utilizando matérias-primas recicladas, contribuindo assim à redução do problema da disposição final dos resíduos sólidos urbanos e desenvolvimento sustentável.

**PALAVRAS-CHAVE:** Polietileno de alta densidade, poliestireno, reciclagem, degradação, desenvolvimento sustentável.

**ABSTRACT:** In view of the immense range of application and volume of polymer consumption in our society and, consequently, the large portion which is disposed improperly into the environment causing serious environmental problems, it becomes necessary to investigate recycling viable routes to each material in order to improve them or even implement environment-friendly products, especially in the current days. At the molecular level, the recycling processes studied for polystyrene (degassing of expanded polystyrene in heated oven) and high density polyethylene (mechanical recycling) cause significant modifications as result of the degradative processes suffered by each material, being of great importance the knowledge of these mechanisms to understand the manner in

which such modifications occur and what their consequences on chemical structure and final properties of the recycled polymers are. As a result, the deep knowledge of the final properties of the recycled polymer becomes essential for its reprocessing in the production of new consumer goods using recycled raw materials, thus helping to reduce the problem of the final disposal of urban solid waste and sustainable development.

**KEYWORDS:** High density polyethylene, polystyrene, recycling, degradation, sustainable development.

## 1 | INTRODUÇÃO

Atualmente, o crescimento elevado do consumo e o descarte inadequado de materiais poliméricos têm agravado problemas relacionados aos resíduos sólidos urbanos (RSUs). No Brasil, no ano de 2010, foi sancionada uma lei que prevê a redução de geração de resíduos sólidos urbanos, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que traz como propósito levar a população ao consumo sustentável, aumento da reciclagem, reutilização de resíduos sólidos e sua destinação correta (Rodrigues, 2018).

De acordo com a PNRS, a segregação mínima dos RSUs é em resíduos recicláveis, resíduos orgânicos e rejeitos. Os resíduos orgânicos são passíveis de reciclagem através do processo de compostagem; os resíduos recicláveis são passíveis de ser reciclados, sendo compostos principalmente por papel e papelão, vidros, metais e polímeros diversos. Já os rejeitos não podem ser reciclados, e apenas esta classe deveria seguir para aterros sanitários (Rodrigues, 2018).

Sabe-se que cada polímero apresenta suas características físicas, químicas e conseqüente parâmetros de processamento específicos. Então, visando facilitar o processo de reciclagem e evitar perdas, a norma ABNT NBR 13230:2008 da Associação Brasileira de Normas Técnicas é uma grande aliada ao setor de reciclagem de polímeros, pois traz como norma a indicação de simbologia de reciclabilidade e a identificação de materiais plásticos, sendo que cada embalagem apresenta a identificação do tipo de polímero presente na composição da embalagem do produto, conforme Figura 1.

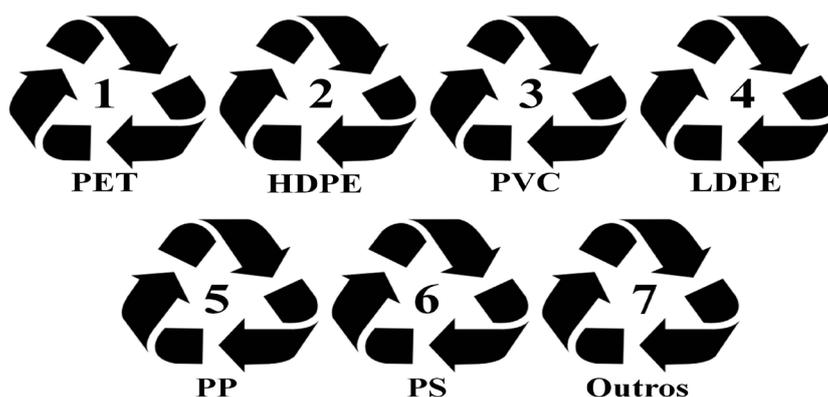


Figura 1: Simbologia e identificação para a reciclagem de embalagens plásticas segundo a Norma ABNT NBR 13230:2008.

Dentre os materiais poliméricos pós-consumo causadores de sérios problemas ambientais devido à disposição inadequada no meio ambiente está o poliestireno expandido (EPS), o qual é constituído de cerca de 5% de poliestireno (PS) em sua forma expandida (EPS), mais conhecido pela marca comercial Isopor®, além de embalagens em geral. Outro material que tem ajudado no agravamento de problemas ambientais, quando o material pós-consumo é disposto de maneira incorreta, é o polietileno de alta densidade (PEAD), um polímero que é largamente utilizado na produção de embalagens em geral. Nesse contexto, a reciclagem trata-se de uma ação sustentável, já que economiza matérias-primas (conservando principalmente o petróleo, um recurso natural não renovável) e energia.

O EPS, material 100% reciclável, possui baixíssima densidade e bom isolamento térmico (entre outras propriedades), o que lhe confere potencial aplicação como embalagens. Ainda, o EPS é frequentemente utilizado para o acondicionamento de eletrodomésticos durante o transporte, evitando choques e impactos do produto. Assim, o EPS está muito presente em nosso cotidiano: na forma de copos descartáveis, utensílios para alimentação, embalagens, caixas e recipientes isolantes térmicos, suportes de eletrodomésticos e muitos outros objetos; entretanto, sua baixa densidade acaba sendo uma contrapartida para a viabilidade econômica de sua reciclagem, pois as peças desse material constituem um enorme volume com uma ínfima massa.

Para o caso de embalagens produzidas com polímeros termoplásticos como o PEAD, uma solução viável para a redução do problema trata-se da reciclagem mecânica. Esse tipo de reciclagem consiste em utilizar materiais poliméricos oriundos de pós-consumo e resíduos de processamento. A reciclagem mecânica tem início na limpeza do material para que se retire resíduos e rótulos. Depois é realizada a triagem, que é feita de acordo com o tipo de polímero. Na sequência é feita a moagem, a qual é realizada para que se tenha a diminuição de tamanho e assim a possibilidade de processamento, com posterior etapa de lavagem. Então, quando o polímero já se encontra em grânulos ele pode ser processado, o processamento é realizado em extrusoras (Rodrigues, 2018). Em se tratando de EPS, das diversas rotas de reciclagem disponíveis, a degasagem em estufa é um método simples e eficiente. No entanto, independente do tipo de polímero a ser reciclado, sabe-se que as etapas às quais os polímeros são submetidos durante o processo são capazes de degradá-los, em maior ou menor grau, podendo acarretar dificuldades ao material reciclado durante sua utilização.

A degradação de um material consiste na perda de propriedades, sejam elas mecânicas, químicas, ópticas, térmicas, dentre outras, em decorrência de diversos fatores como exposição à luz, a agentes químicos, esforços mecânicos ou termomecânicos, condições térmicas e envelhecimento. Todas as classes de materiais estão sujeitas a esses processos, sendo os materiais poliméricos bons exemplos das mudanças decorrentes da degradação.

Sabe-se que cada tipo de material polimérico, devido principalmente à sua estrutura química, apresenta pelo menos um tipo de mecanismo de degradação específico. O conhecimento do(s) mecanismo(s) de degradação de cada material polimérico é de extrema importância, sendo que os níveis de degradação podem ser medidos através de análises químicas, como a espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) e índice de fluidez, pelo uso de viscosímetros. O uso dessas técnicas torna-se cada vez mais importante, uma vez que o controle das propriedades torna-se maior e mais exigente, garantindo um processo de reciclagem mais eficiente e ambientalmente amigável.

No presente trabalho, utilizou-se a degasagem em estufa para o EPS, e a reciclagem mecânica para o PEAD, analisando alterações na estrutura química a partir do FTIR e alterações no índice de fluidez pelo uso do viscosímetro. Nas seções seguintes, serão apresentados os mecanismos de degradação verificados durante a reciclagem do PS e do PEAD.

## 2 | MECANISMOS DEGRADATIVOS DO PS

O PS é um polímero caracterizado pela presença de radicais fenil, ligados alternadamente em carbonos terciários, ao longo de sua cadeia. À temperatura ambiente, apresenta-se rígido (sua temperatura de transição vítrea está na faixa dos 100°C). Normalmente, é um polímero amorfo (poliestireno atático), contudo, dependendo do tipo de polimerização utilizado, pode apresentar cristalinidade (poliestireno sindiotático).

Conforme citado anteriormente, uma das formas mais conhecidas do poliestireno é o EPS, sigla do inglês *expanded polystyrene*, ou poliestireno expandido, de nome comercial Isopor®. O processo de expansão envolve a incorporação de pentano (em substituição ao CFC, danoso ao meio ambiente, largamente utilizado no passado). As esferas incham conforme o pentano torna-se um gás dentro delas, devido a altas temperaturas provenientes de aquecimento por vapor. A próxima etapa, o armazenamento em silos, permite a estabilização do gás no interior das esferas (“Michigan Foam”). Pode-se dizer que ao menos 95% de sua constituição é “ar” (gás); o restante, poliestireno.

Consistindo na retirada do gás expansor por meio da aplicação de calor, a degasagem (semelhante à pirólise, porém sem controle da atmosfera necessariamente) trata-se, basicamente, do aquecimento do material em equipamentos que proporcionem controle de temperatura, podendo ser variados durante o processo a temperatura e tempo de permanência da amostra à referida temperatura.

No entanto, essa exposição ao calor acarreta em mudanças na estrutura química do material, como resultado de processos degradativos. Um dos mecanismos de degradação térmica existentes em materiais poliméricos é a cisão de cadeia (Faravelli *et al.*, 2001) podendo ser homolítica ou heterolítica. Esse mecanismo é autocatalítico,

ou seja, dividido em três etapas: a iniciação, a propagação e a terminação da reação.

A iniciação da cisão ocorre quando a energia fornecida ao material é capaz de romper uma ligação covalente na cadeia, formando um radical livre e, geralmente, um átomo de hidrogênio instável.

Algumas ligações, por terem energias de ligação menores, são “alvos” preferenciais da cisão. Ligações C-C, por exemplo, são possivelmente as primeiras a serem rompidas pelo fornecimento de calor. Ligações C-H envolvendo carbono terciário (presentes ao longo da cadeia do PS) também podem ser quebradas com maior facilidade do que as que possuem carbono primário ou secundário (De Paoli, 2009).

A propagação usualmente envolve a formação de um peróxido no radical livre, por sua vez removendo outro hidrogênio na cadeia (formando um hidroperóxido) e resultando em mais um radical livre (Jabur, 2011). Cabe ressaltar também que pode ocorrer a captação de átomos de oxigênio da atmosfera, resultando em oxidação, pois não necessariamente a degradação ocorre em meio inerte.

A terminação pode ocorrer por recombinação de dois radicais livres, por exemplo.

Intuitivamente, pode-se afirmar que o processo de cisão de cadeias, consequência da degradação, resulta em perda de propriedades do material, o que pode servir como obstáculo para a utilização de PS reciclado em novos bens de consumo. O mecanismo degradativo simplificado que ocorre no PS, processo de cisão de cadeia, é apresentado na Figura 2. No mecanismo, um segmento de cadeia de PS é apresentado sendo que, a partir do fornecimento de energia (quando superior à energia da ligação C-C de sua cadeia principal), é capaz de rompê-la, gerando um radical livre que, a partir da recombinação a fim de estabilizá-lo, pode vir a ligar-se novamente ou ligar-se a outro(s) elementos/grupos químicos ('X' no esquema), proveniente do próprio sistema ou atmosfera ao qual o material esteja submetido. Maiores detalhes serão fornecidos na seção de Resultados e discussão (seção 5.1).

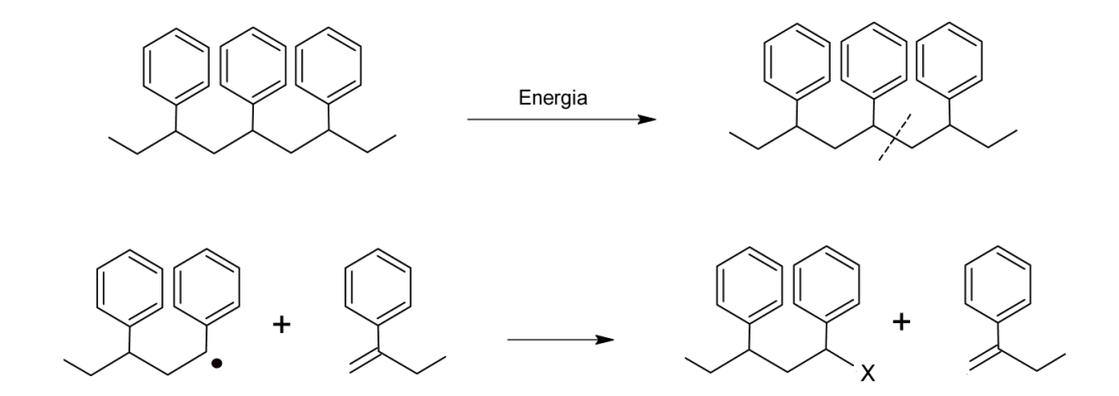


Figura 2: Esquema do mecanismo degradativo simplificado do PS, baseado em Faravelli et al. (Faravelli *et al.*, 2001).

Outro processo de degradação, usual em materiais poliméricos, é a despolimerização. No PS ocorre acima de 250°C. Também pode ser dividida em

iniciação, propagação e terminação (De Paoli, 2009).

A despolimerização inicia-se pela formação de macrorradicais livres, com origem em, por exemplo, defeitos de polimerização. Esses macrorradicais recebem um elétron proveniente da quebra de uma ligação C-C aleatória. Quanto maior a estabilidade desses macrorradicais livres, mais propícia será a propagação da reação de despolimerização. No caso do PS, a presença do carbono terciário, conforme citado anteriormente, acaba sendo um “alvo” preferencial para a quebra da cadeia (visto que a energia necessária para tal, naquele ponto, é inferior em relação às demais ligações), fato que proporciona um macrorradical livre extremamente estável, estabilizado em ressonância com o anel aromático (o qual é ligado ao carbono terciário ao longo da cadeia). Com base nisso, pode-se dizer que, no PS, o efeito da reação de propagação do mecanismo de despolimerização é acentuado graças à presença de carbonos terciários (ligados ao fenil) e à consequente formação de macrorradicais estáveis (De Paoli, 2009).

A terminação pode ocorrer por recombinação de radicais livres, ou pelo processo de cisão- $\beta$ , onde se forma uma ligação dupla terminal oriunda da quebra de uma ligação C-H de um carbono que se encontra em posição  $\beta$  em relação ao radical livre (De Paoli, 2009).

Vale ressaltar que o mecanismo de despolimerização vem a ocorrer no PS apenas em temperaturas maiores que 250°C (De Paoli, 2009).

### 3 | MECANISMOS DEGRADATIVOS DO PEAD

De acordo com Hinsken et al. (Hinsken *et al.*, 1991), os principais mecanismos de degradação de PEAD são a cisão de cadeia e ramificação de cadeia seguido de reticulação.

A cisão ocorre quando uma energia localizada numa determinada ligação for superior à energia de ligação. Tal energia pode ser de diferentes formas: luz (fotólise), radiação gama (radiólise), calor (termólise) ou cisalhamento (rompimento mecânico). O polietileno é uma poliolefina que é obtida através de uma polimerização de adição, as poliolefinas tem a quebra de ligação C-C simples reduzindo a massa molar do polímero. A cisão de cadeia pode ser de forma homolítica e heterolítica, dependendo de como a degradação inicia-se. Homolítica corresponde à quebra da ligação covalente com um elétron ficando ligado em cada fragmento, assim originando dois radicais livres; já na heterolítica, o par de elétrons fica ligado a um dos fragmentos e o outro fragmento ficará com falta de elétrons. Em geral, a homolítica, que gera macrorradicais alquila, acontece em maior número (De Paoli, 2009).

No caso das poliolefinas, quando há o rompimento da ligação C-C, serão formados dois macrorradicais alquila que podem recombinar-se ou difundirem-se na massa polimérica, o que vai depender do estado físico, morfologia e temperatura do material. Depois de ocorrer a formação dos radicais livres, a reação radicalar pode

tanto difundir-se como recombinar-se de forma intramolecular ou intermolecular. Caso aconteça uma recombinação intermolecular haverá a reticulação, e caso ocorra a intramolecular ocorrerá a ciclização (De Paoli, 2009).

O início do processo de degradação ocorre devido à formação de radicais alquila (R $\cdot$ ) devido à ação conjunta de tensões cisalhantes e temperatura. Caso o oxigênio esteja presente em abundância, ele reagirá facilmente com os macrorradicais, resultando na propagação da degradação através da produção de radicais livres, tais como peróxido (ROO $\cdot$ ), alcóxido (RO $\cdot$ ), hidroxila (HO $\cdot$ ) e produtos instáveis, como o hidroperóxido (ROOH). Tais componentes, altamente instáveis e reativos, atacam a cadeia, abstraindo outros átomos da cadeia carbônica principal do polímero, propagando as reações de degradação (do Nascimento e Pinheiro, 2009).

Ambas cisão- $\beta$  e quebra do radical peróxido conduzirão à redução da massa molecular do polímero devido à cisão de cadeia das macromoléculas. Cisalhamento mecânico também pode contribuir para o aumento das cisões. Os radicais alquil resultantes reagem de acordo com a Figura 3, podendo ocorrer de acordo com as equações 1 e/ou 2 da figura. Nesse caso, haverá redução da viscosidade do PEAD.

A recombinação de dois macrorradicais corresponde à etapa de terminação da reação, podendo formar insaturações vinílicas e trans-vinilênicas, caso o radical esteja em um carbono primário e secundário, respectivamente (Hinsken *et al.*, 1991). De acordo com Hinsken et al. (Hinsken *et al.*, 1991), radicais alquila podem reagir com grupos vinil, resultando na reação de adição e subsequente reticulação, o que causa o aumento na viscosidade do material. O mecanismo simplificado de ramificação de cadeia seguido de reticulação é mostrado na Figura 4.

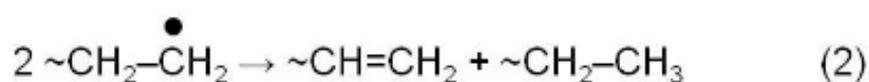
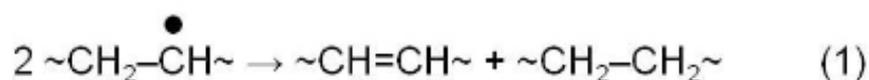


Figura 3: Mecanismo de cisão de cadeia do PEAD (etapa de terminação), baseado em Hinsken et al. (Hinsken *et al.*, 1991).

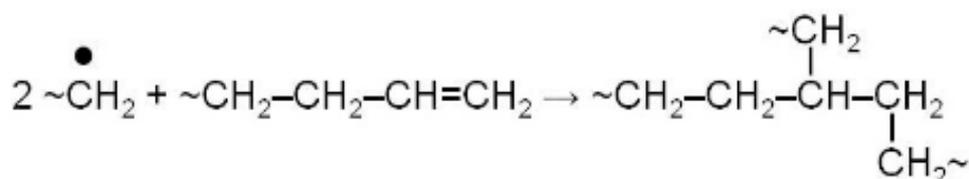


Figura 4: Mecanismo de ramificação de cadeia seguido de reticulação do PEAD (etapa de terminação), baseado em Hinsken et al. (Hinsken *et al.*, 1991).

Na sequência será abordada a parte experimental no trabalho, no qual o EPS e PEAD foram reciclados (por degasagem em estufa aquecida e por reciclagem

mecânica, respectivamente), sendo que alterações na estrutura química e índice de fluidez das amostras como resultado de processos de degradação foram analisados.

## 4 | METODOLOGIA

### 4.1 MATERIAIS

Foi utilizado o EPS proveniente de lojas de eletrodomésticos da cidade de Pelotas, e o PEAD proveniente de embalagens de materiais de limpeza descartados da Universidade Federal de Pelotas. No caso do PEAD, todas as embalagens apresentam o código 2 (referente ao PEAD), de acordo com a Norma ABNT NBR 13230:2008 (Figura 1).

### 4.2 MÉTODOS

#### 4.2.1 DEGASAGEM DO EPS

Os resíduos de EPS coletados foram cortados em formas irregulares. Estes foram degasados em estufa a 150°C a diferentes períodos de tempo, de 1 a 5 horas, para análise da influência do tempo de degasagem nas propriedades finais do PS reciclado. Após a degasagem, as amostras foram moídas em moinho de facas da marca Marconi. A nomenclatura das amostras segue o tempo de degasagem em estufa.

#### 4.2.2 LIMPEZA, CORTE, MOAGEM E EXTRUSÃO DO PEAD

As embalagens de PEAD foram lavadas com detergente neutro em água corrente. Depois de secas ao ambiente, foram cortadas de formas irregulares e moídas em moinho de facas da marca Marconi, resultando num pó de granulometria homogênea. O material resultante foi então extrudado, variando o número de extrusões. As propriedades das amostras foram analisadas de acordo com o número de extrusões. Utilizou-se uma extrusora de rosca simples da marca ECO, com temperaturas de todas as zonas de aquecimento do barril de 180°C e com uma rotação de 100 rpm. As amostras extrudadas em formato de macarrão foram moídas em moinho de facas da marca Marconi. A nomenclatura das amostras refere-se ao respectivo número de extrusões ao qual foi submetida.

#### 4.2.3 ANÁLISE DE ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO

As mudanças ocorridas na estrutura química das amostras como resultado do processo de extrusão (PEAD) e do processo de degasagem (EPS) foram analisadas por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier com reflexão total atenuada (FTIR-ATR), utilizando-se um espectrofotômetro IRPrestige-21, da marca Shimadzu, na faixa de espectro de 4000 cm<sup>-1</sup> a 500 cm<sup>-1</sup>, e 21 varreduras.

#### 4.2.4 ANÁLISE DO ÍNDICE DE FLUIDEZ

A análise do índice de fluidez foi realizada para verificar a influência da alteração da estrutura química das amostras no seu índice de fluidez. Foi realizada em um plastômetro da marca CEAST Italy, modelo Melt flow modular line, a 200°C (PS) e a 190° (PEAD), e carga de 5 kg, de acordo com a norma ASTM D 1238.

## 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 EPS

A Figura 5 apresenta os resultados de índice de fluidez das amostras degasadas.

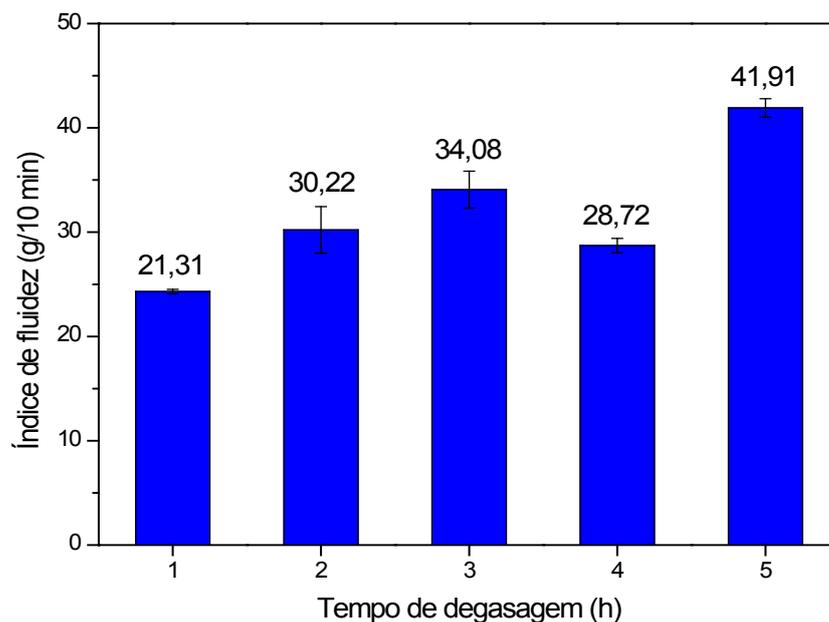


Figura 5: Valores de índice de fluidez das amostras degasadas.

O gráfico mostra grandes variações na fluidez das amostras, em função do tempo de permanência destas em estufa aquecida. Tais variações observadas devem-se aos processos degradativos sofridos pelo EPS durante o processo de degasagem em estufa, sendo que o aumento nos valores de índice de fluidez refere-se à redução da viscosidade das amostras degasadas devido ao mecanismo de cisão de cadeia, conforme previamente discutido na seção 2 deste trabalho.

A Figura 6 apresenta os resultados de FTIR das amostras degasadas.

Na análise de FTIR-ATR, pôde-se notar o surgimento de dois picos estranhos ao padrão para o PS, sendo o pico em 2350  $\text{cm}^{-1}$  referente à formação de dióxido de carbono (Danon, Stair e Weitz, 2011) e o pico em 3335  $\text{cm}^{-1}$  referente ao estiramento de ligação O-H (Oh *et al.*, 2005). Observa-se claramente variação dos picos de acordo com o tempo de exposição das amostras, sendo que o relacionado às ligações O-H apresenta variações mais significativas.

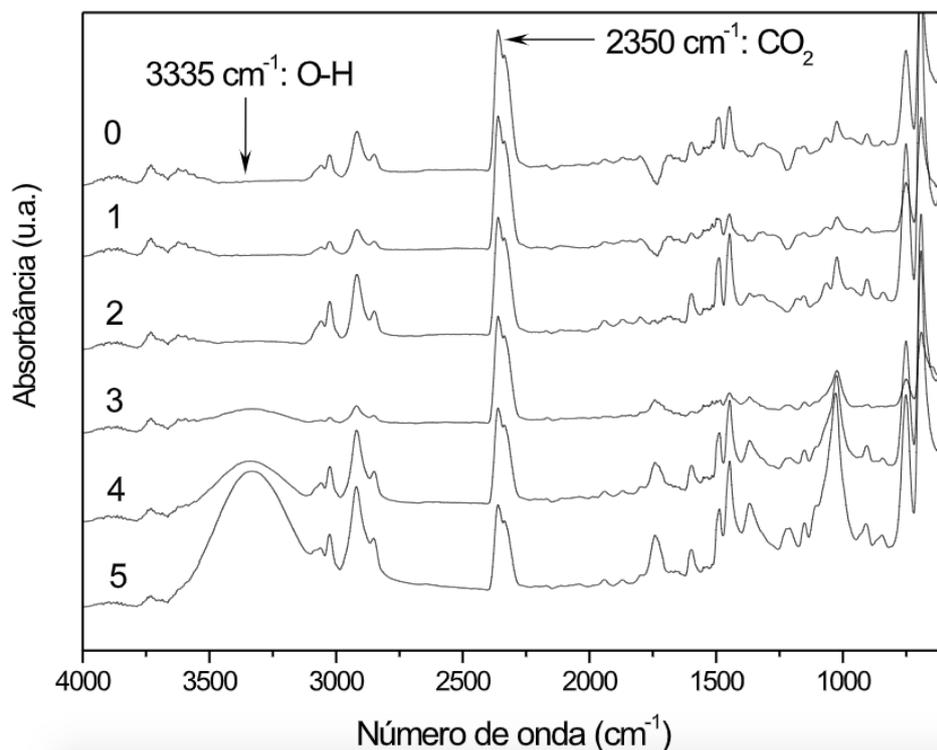


Figura 6: Espectros de FTIR obtidos para as amostras degasadas.

Sugere-se, assim, que o EPS, ao passar por degasagem, sofra processo de degradação térmica por cisão de cadeia. A observação de dióxido de carbono nas amostras deve-se, provavelmente, a algum gás ou composto utilizado na fabricação ou incorporado em algum momento da vida útil do material, visto que não houve como ter conhecimento da procedência das peças coletadas.

Já as ligações O-H presentes nas amostras degasadas de 3 a 5 horas podem ter surgido durante a fase de propagação da cisão de cadeia, sendo que as reações envolvendo radicais livres liberam átomos de hidrogênio da cadeia. Estes, então, além de formarem hidroperóxidos com esses radicais, podem ter se unido ao oxigênio da atmosfera, pois esta não era inerte durante a degasagem. Essa oxidação, então, pode ser responsável pela variação observada na fluidez das amostras. Ambos os picos observados de O-H e CO<sub>2</sub> referem-se ao 'X' representado no mecanismo degradativo simplificado do PS (Figura 2), os quais atuam estabilizando radicais livres formados durante a cisão de cadeia do PS.

## 5.2 PEAD

Os resultados do índice de fluidez das amostras analisadas estão presentes na Figura 7.

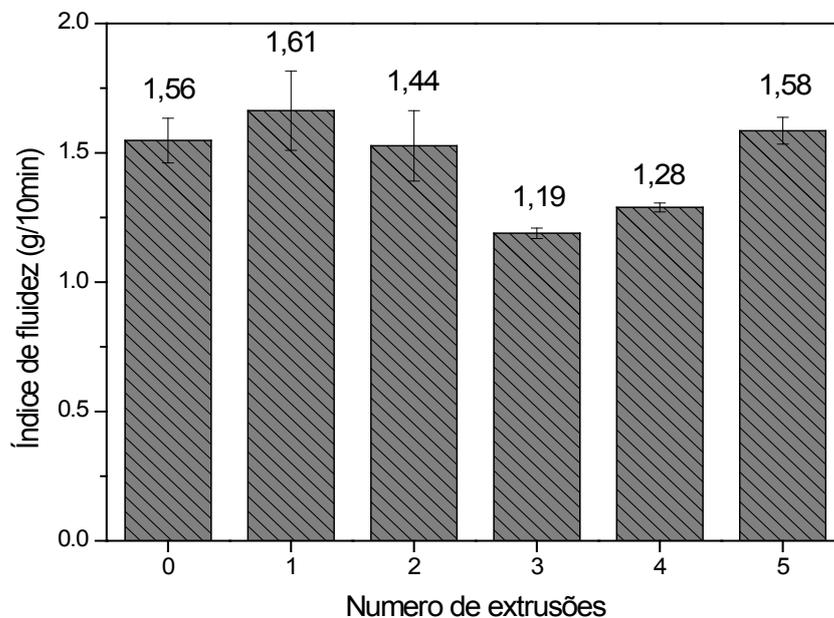


Figura 7: Valores de índice de fluidez das amostras de PEAD extrudadas.

De acordo com os resultados, percebe-se que os valores de índice de fluidez das amostras variaram de acordo com o número de extrusões, sendo resultado do grau de degradação termomecânica sofrida pela amostra. De acordo com Hinsken et al. (Hinsken *et al.*, 1991), os radicais alquila e grupos vinila resultam no aumento da massa molecular devido à ramificação e reticulação da cadeia central, enquanto a cisão e a quebra do radical peróxi resultam na diminuição da massa molecular do polímero. Os principais mecanismos de degradação do PEAD são a cisão de cadeia e a ramificação de cadeia seguida por reticulação. Assim, a cisão de cadeia reduz a viscosidade da amostra, enquanto a reticulação aumenta sua viscosidade, acarretando mudanças no índice de fluidez.

De acordo com Silvano et al. (Silvano *et al.*, 2013), o aumento do número de ciclos de reprocessamento leva à formação de mais radicais alquila, aumentando a probabilidade de que eles se combinem e produzam grupos de insaturação. Tais alterações na estrutura das amostras podem ser confirmadas através da análise de FTIR (Figura 8).

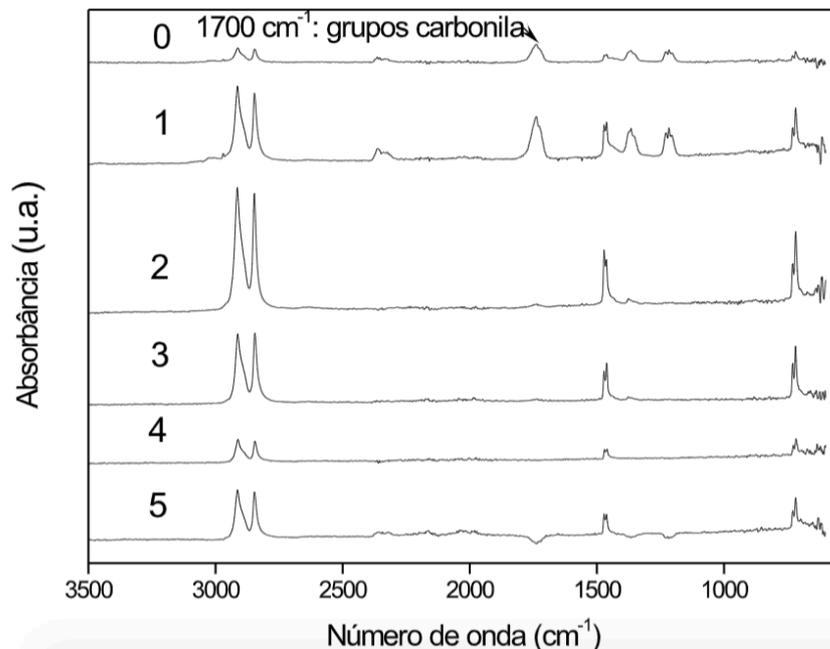


Figura 8: Espectros de FTIR das amostras, de acordo com o número de extrusões.

O grupo carbonílico na região de  $1700\text{ cm}^{-1}$  que aparece nas amostras 0 e 1 refere-se à cisão de cadeia (Silvano *et al.*, 2013). Nessas amostras, maiores valores de índice de fluidez como resultado da cisão de cadeia foram observados como consequente redução na viscosidade das amostras. Nas demais amostras não foi observado a presença desse pico, sendo que elas apresentaram menores índices de fluidez, como provável resultado da reticulação das cadeias e aumento da viscosidade. De acordo com Silvano et al. (Silvano *et al.*, 2013), o grupo carbonila é produzido pelo radical alquila e reação com o oxigênio, o radical alquila tira um elétron da ligação C-C, o acontecimento transforma no grupo oxidado no grupo carbonílico e a cadeia polimérica sofre um mecanismo de cisão- $\beta$ .

## 6 | CONCLUSÕES

Em relação ao EPS, a análise da estrutura química, realizada via FTIR, evidenciou a alteração em duas ligações: O-H, que provavelmente refere-se à oxidação do PS ocorrida durante o processo de degasagem (por processos oxidativos), e formação de dióxido de carbono, cuja causa está supostamente relacionada ao gás usado como agente expensor do PS na produção do EPS.

Já em relação ao PEAD, o processo de reciclagem mecânica, principalmente a etapa do processamento em extrusora, é capaz de degradá-lo em diferentes graus. De acordo com os resultados, observou-se que acontece uma variação nos níveis de viscosidade do material, conforme varia o número de extrusões como consequência dos mecanismos de degradação por cisão de cadeia e ramificação seguida por reticulação. Foi possível observar que quando há cisão das cadeias a massa molecular diminui, consequentemente o material fica menos viscoso; de maneira contrária

acontece quando há reticulação do material, sua massa molecular aumenta e assim sua viscosidade torna-se maior.

De forma geral, as modificações químicas observadas no PS e PEAD, resultantes dos processos de degradação ocorridos durante o processo de reciclagem, tendem a dificultar a utilização desses materiais em processos posteriores, dada a redução de propriedades (especialmente mecânicas) que os polímeros reciclados apresentarão. A degradação, assim, apresenta-se como um obstáculo tanto na reutilização direta desses polímeros reciclados quanto na reincorporação destes em outros processamentos. Ainda, por estarem degradados, esses polímeros podem ter uma difícil reinserção no mercado na forma de outros produtos, pois a perda de propriedades torna o material reciclado economicamente menos atrativo do que o mesmo material virgem.

A partir desse ponto, buscam-se alternativas que corroborem a implementação de materiais reciclados em novos produtos, como a incorporação de aditivos (preferencialmente de fontes naturais) que reduzam os efeitos da degradação, aprimorando ou recuperando as propriedades perdidas pelo polímero durante a reciclagem.

O conhecimento das propriedades finais do polímero reciclado, como a viscosidade do material de acordo com seu processo de degradação, torna-se útil para o reprocessamento do material na produção de novos bens de consumo utilizando matérias-primas recicladas, contribuindo assim à redução do problema da disposição final dos RSUs e ao desenvolvimento sustentável.

## 7 | AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório Centro de Desenvolvimento e Controle de Biomateriais (CDC-Bio) da Universidade Federal de Pelotas e ao Laboratório de Materiais da Universidade Federal do ABC pelo uso das instalações laboratoriais.

## REFERÊNCIAS

DANON, A.; STAIR, P. C.; WEITZ, E. FTIR study of CO<sub>2</sub> adsorption on amine-grafted SBA-15: Elucidation of adsorbed species. **The Journal of Physical Chemistry C**, v. 115, n. 23, p. 11540–11549, 2011.

DE PAOLI, M.-A. **Degradação e estabilização de polímeros**. São Paulo: Artliber, 2009.

FARAVELLI, T. *et al.* Thermal degradation of polystyrene. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 60, n. 1, p. 103–121, 2001.

HINSKEN, H. *et al.* Degradation of polyolefins during melt processing. **Polymer Degradation and Stability**, v. 34, n. 1–3, p. 279–293, 1991.

JABUR, A. R. Thermal degradation effect on the fracture toughness of glass filler reinforced unsaturated polyester resin composite. **The Iraqi Journal For Mechanical And Material Engineering**, v. 11, n. 4, p. 709–719, 2011.

\_\_\_\_\_. **Michigan Foam**. Disponível em: <[http://www.michiganfoam.com/eps\\_technical\\_info.html](http://www.michiganfoam.com/eps_technical_info.html)>. Acesso em 10/01/2019.

NASCIMENTO, E. ; PINHEIRO, L. A. Estudo da degradação termo-oxidativa do polietileno de alta densidade. **Anais do 10º Congresso Brasileiro de Polímeros**, 2009.

OH, S. Y. *et al.* FTIR analysis of cellulose treated with sodium hydroxide and carbon dioxide. **Carbohydrate Research**, v. 340, n. 3, p. 417–428, 2005.

RODRIGUES, M. A. **Revalorização de resíduos poliméricos através da produção de blendas ecologicamente corretas contendo materiais biodegradáveis**. Universidade Federal de Pelotas, 2018.

SILVANO, J. D. *et al.* Effect of reprocessing and clay concentration on the degradation of polypropylene/montmorillonite nanocomposites during twin screw extrusion. **Polymer Degradation and Stability**, v. 98, n. 3, p. 801–808, 2013.

## ASSOCIAÇÃO DA FILTRAÇÃO DIRETA E USO DE COAGULANTES NATURAIS E QUÍMICOS NO TRATAMENTO DE ÁGUA DE ABASTECIMENTO

### **Edilaine Regina Pereira**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná,  
UTFPR  
Londrina – PR

### **Dandley Vizibelli**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná,  
UTFPR  
Londrina – PR

### **Thaís Ribeiro**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná,  
UTFPR  
Londrina – PR

### **Fellipe Jhordã Ladeia Janz**

Universidade Tecnológica Federal do Paraná,  
UTFPR  
Londrina – PR

### **José Euclides Stipp Paterniani**

Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP  
Campinas – SP

**RESUMO:** Este trabalho apresenta como proposta estudar a eficiência do processo de filtração somado aos processos de coagulação, floculação e sedimentação no tratamento de água a partir da comparação entre os coagulantes Sulfato de Alumínio, *Moringa oleifera* e Tanino. Simulou-se a partir da metodologia do jar-teste as mesmas condições adotadas em estações de tratamento. Utilizou-se três coagulantes nas seguintes concentrações: Sulfato de

Alumínio ( $6\text{mg L}^{-1}$ ), *Moringa oleifera* ( $3\text{mg L}^{-1}$ ) e o Tanino ( $3\text{mg L}^{-1}$ ). Analisou-se os parâmetros pH, condutividade elétrica, temperatura, cor aparente e turbidez. Os resultados evidenciam a *Moringa oleifera* como o coagulante mais efetivo, seguido pelo Tanino e Sulfato de Alumínio. A análise dos dados demonstra o sucesso do emprego da filtração ao final do processo de tratamento, uma vez que os índices de cor aparente e turbidez registram quedas consideráveis para uso da *Moringa oleifera* (96,57% e 91,30%, respectivamente), seguidos pelo Tanino (93,83% e 88,42%), e pelo Sulfato de Alumínio (74,65% e 65,79%). Os índices de condutividade elétrica registraram elevações quando empregado o coagulante *Moringa oleifera*, e os índices de pH não apresentaram variação após a atuação dos filtros, permitindo afirmar que esta proposta se mostrou muito útil para melhorar ainda mais a qualidade da água.

**PALAVRAS-CHAVE:** filtração direta; coagulantes; tratamento de água

**ABSTRACT:** This work presents as a proposal study the efficiency of the filtration process added to the coagulation, flocculation and sedimentation processes in the water treatment from the comparison between the coagulants Aluminum Sulphate, *Moringa oleifera* and Tannin. The same conditions adopted in treatment plants were simulated from the jar-test

methodology. Three coagulants were used in the following concentrations: Aluminum Sulfate ( $6\text{mg L}^{-1}$ ), *Moringa oleifera* ( $3\text{mg L}^{-1}$ ) and Tannin ( $3\text{mg L}^{-1}$ ). The parameters pH, electrical conductivity, temperature, apparent color and turbidity were analyzed. The results show *Moringa oleifera* as the most effective coagulant, followed by Tannin and Aluminum Sulphate. The analysis of the data demonstrates the success of the use of filtration at the end of the treatment process, since the apparent color and turbidity indices recorded considerable decreases in the use of *Moringa oleifera* (96.57% and 91.30%, respectively), followed by Tannin (93.83% and 88.42%), and by Aluminum Sulphate (74.65% and 65.79%). The electrical conductivity indexes registered elevations when the *Moringa oleifera* coagulant was used, and the pH indexes did not show any variation after the filters performance, allowing to affirm that this proposal proved very useful to improve water quality even more.

**KEYWORDS:** direct filtration; coagulants; water treatment.

## 1 | INTRODUÇÃO

O processo de tratamento de água consiste em uma série de processos e operações independentes, ordenadas a fim de apresentar o melhor desempenho para o resultado final. Alguns desses processos independentes como a coagulação, utilizam agentes químicos que podem ser de muitas maneiras perigosos e prejudiciais em se tratando do meio ambiente e sustentabilidade, como é o caso do Sulfato de Alumínio que fica presente no lodo gerado durante o tratamento. Macedo (2007) avalia que a coagulação é uma das etapas mais importantes que compõe as estações de tratamento de água, haja vista a necessidade de desestabilização química das partículas contidas nas águas, para a posterior aglutinação e sedimentação nas unidades de floculação e coagulação, respectivamente. Outra dessas operações independentes que possui um importante papel no processo de tratamento de água é a filtração, uma vez que esta é responsável por grande parte da retenção de partículas (DI BERNARDO, 2005). Encontra-se então a necessidade de desenvolver pesquisas para verificar novas possibilidades que atendam de maneira mais eficiente os critérios de sustentabilidade e preocupação com o meio ambiente, eliminando ou diminuindo os produtos químicos geradores de resíduo. Sendo assim, este trabalho objetivou realizar uma aplicação comparativa entre coagulantes naturais e químicos, associados a uma técnica de filtração rápida a fim de verificar possibilidades para o tratamento de água.

## 2 | MATERIAL E MÉTODOS

Coletou-se as amostras tratadas nesta pesquisa no Ribeirão Jacutinga, corpo hídrico objeto de captação para o abastecimento de água da cidade de Ipirorã, Paraná, e realizou-se os ensaios nos Laboratório de Saneamento e Laboratório de Poluentes Atmosféricos, instalações da Universidade Tecnológica Federal do

Paraná (UTFPR), campus Londrina. Durante o ensaio, utilizou-se três coagulantes para posterior comparação, sendo eles o Sulfato de Alumínio, a *Moringa oleifera*, e o Tanino, para os mesmos adotou-se as concentrações  $6\text{mg L}^{-1}$ ,  $3\text{mg L}^{-1}$ , e  $3\text{mg L}^{-1}$ , respectivamente. Preparou-se as soluções de maneira que, para a *Moringa oleifera*, 10g da semente descascada, 1M de NaCl, e 1L de água destilada, foram processados, e coados, separando a matéria orgânica grosseira da solução final. Para a solução de Tanino, adicionou-se 1mL do mesmo a 1L de água destilada, e para a solução de Sulfato de Alumínio, a mesma proporção, sendo 1g de sulfato para 1L de água destilada. Simulou-se então, a partir da metodologia do Jar-test as mesmas condições adotadas em estações de tratamento. Adaptou-se as configurações do equipamento Jar-test a partir de Theodoro (2012), sendo inicialmente adotado um tempo de mistura rápida de 3 minutos com rotação de aproximadamente 150 rpm para que o processo de coagulação se realizasse. Posteriormente, para o processo de floculação, a velocidade foi reduzida a 15 rpm em um tempo de mistura de 10 minutos. Em seguida, o equipamento Jar-test foi desligado e deu-se início ao processo de sedimentação. Coletou-se as amostras para análise dos parâmetros estabelecidos durante o processo de sedimentação, sendo a primeira coletada após 3 minutos do início do processo, e as demais em um intervalo de 10 minutos entre si. Assim que totalizou amostras coletadas em 4 tempos durante o processo de sedimentação, 3, 13, 23, e 33 minutos, a água foi transferida aos filtros onde novamente realizou-se uma coleta de amostras para as análise dos parâmetros ao final do processo. Para a filtração, utilizou-se uma estrutura de ferro montada logo abaixo do Jar-test. Apoiou-se nessa estrutura seis leitos filtrantes semelhantes, confeccionados de Polietileno Tereftalo (PET), dimensionados aproximadamente com 25 cm de comprimento e 10 cm de diâmetro interno cada (Figura 1).



Figura 1. Estrutura de funcionamento dos filtros

Seguindo a recomendação de Di Bernardo et al. (2003), dos 25 centímetros de cada leito filtrante, 15 foram preenchidos por areia, 3 cm preenchidos por brita, e 2 cm preenchidos por algodão, contendo também um filtro de café em contato com o algodão

e a brita, na extremidade inferior, com a função de retenção dos grãos do leito filtrante. A granulometria da areia utilizada foi a mesma em todo o ensaio, dentro de uma faixa de 0,600 a 0,850mm. Realizou-se o experimento em duplicata para cada coagulante, e analisou-se os parâmetros pH, condutividade elétrica, temperatura, turbidez e cor aparente, e através dos resultados obtidos, realizou-se também análises estatísticas com o auxílio do programa BioEstat 5.0, comparando ao final os resultados para todos os parâmetros estabelecidos.

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de pH e condutividade elétrica observados no decorrer do ensaio, estão respectivamente representados nas Figuras 2a e 2b.

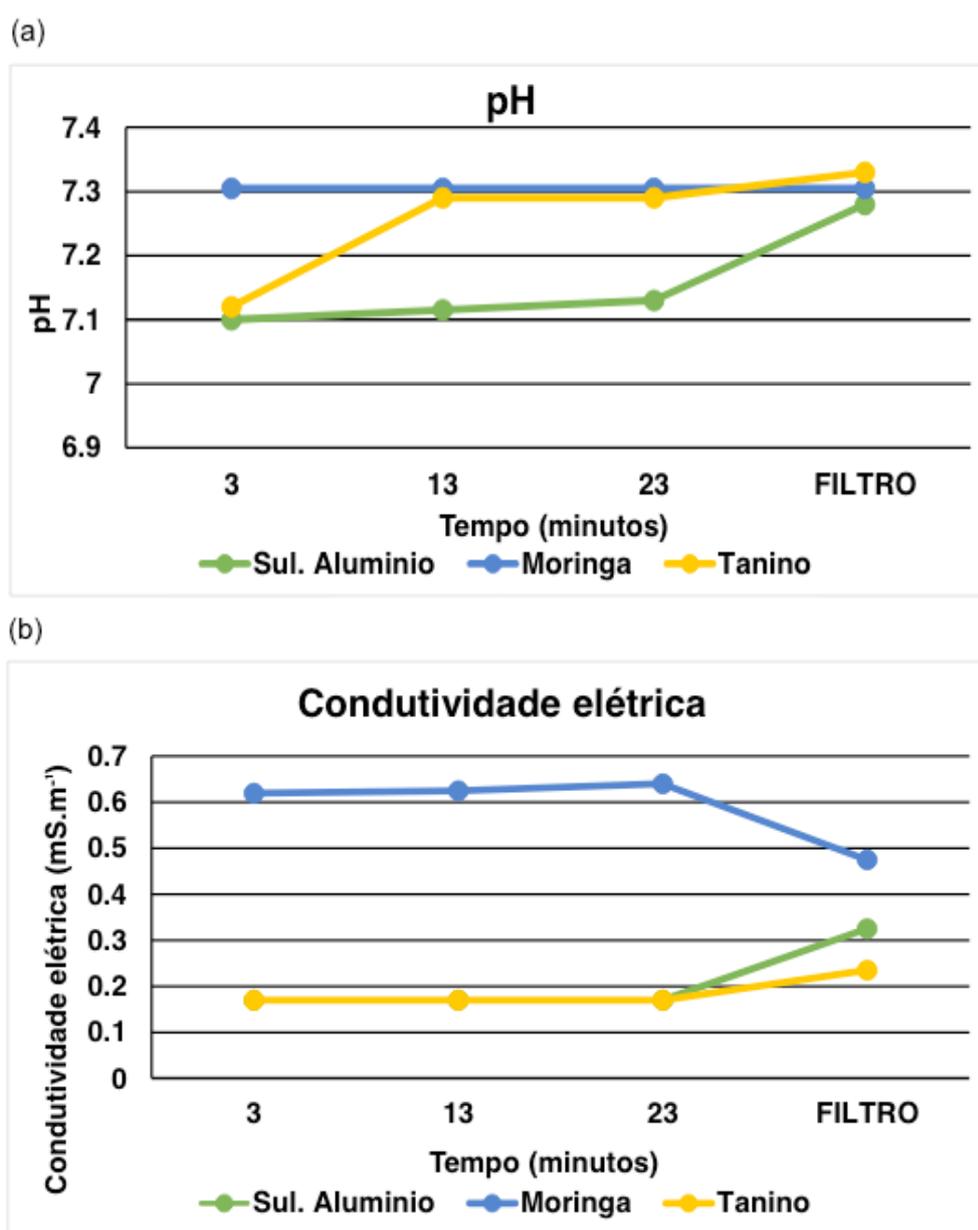


Figura 2. Valores de pH (a), e de condutividade elétrica (b).

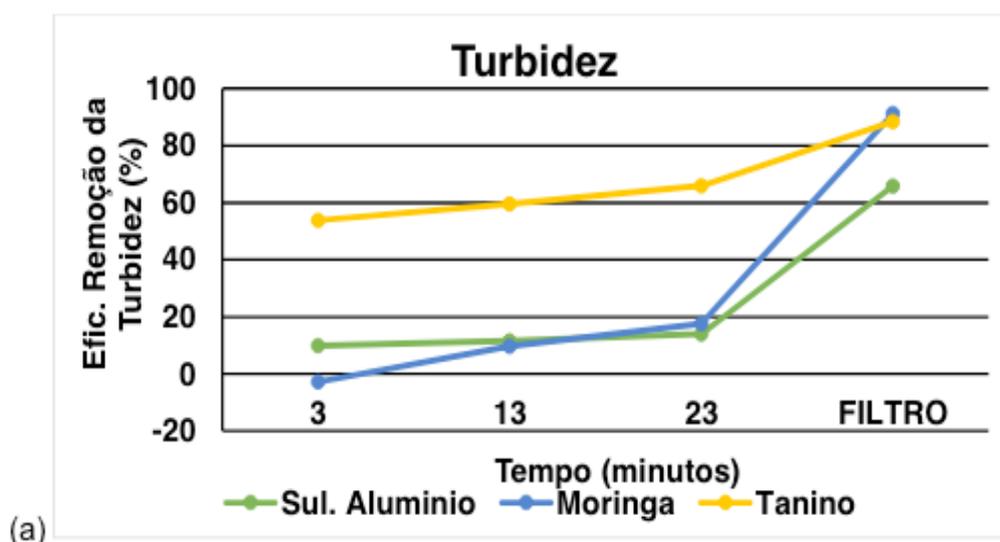
Ao analisar os dados na Figura 2a, nota-se que os valores desse parâmetro

se mantiveram estáveis na maior parte do ensaio, apresentando pequena variação apenas nos instantes entre 3 e 13 minutos com uso do Tanino, e no instante entre 23 minutos e a filtração, para o Sulfato de Alumino. É importante destacar ainda que após a filtração, os dados de pH não demonstraram variação significativa entre si, e os valores se mantiveram dentro da faixa de pH estabelecida pela portaria N° 2914 de 2011, emitida pelo Ministério da Saúde (BRASIL, 2011), que estabelece pH entre 6,0 e 9,5 para águas no sistema de distribuição.

Na Figura 2b observa-se que a solução de *Moringa oleífera* se destoa das demais. Sua maior condutividade elétrica de  $0,640\mu\text{S}$  no pré-filtro e  $0,475\mu\text{S}$  no pós-filtro, se deve ao fato da sua solução salina de propriedades iônicas apresentar maior facilidade para a condução elétrica. É visível também, a tendência dos três coagulantes de se igualarem após o emprego dos filtros, porém, mesmo nestes dados, a solução coagulante de *Moringa oleífera* apresenta diferenças significativas em comparação com seus pares e a amostra bruta ( $0,17\text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$ ). Os dados de temperatura se comportaram de maneira semelhante ao decorrer do tempo de ensaio.

Aplicando o teste de Turkey, para a comparação e análise de significância entre estes dados, observa-se que apenas o Tanino e a *Moringa oleífera*, no instante inicial, ocorreu variação significativa.

Os valores de turbidez e cor aparente representados na Figura 3a e 3b, respectivamente, apresentam o comportamento da eficiência de remoção no decorrer do ensaio. A presença da *Moringa oleífera* possibilitou uma remoção de turbidez em 91,30%, seguidos do tanino (88,42%) e sulfato de alumínio (65,79%), respectivamente. Já para a cor aparente (b) houve remoção de 96,57% seguido do tanino com 93,83% e sulfato de alumínio com 74,65%.



(b)

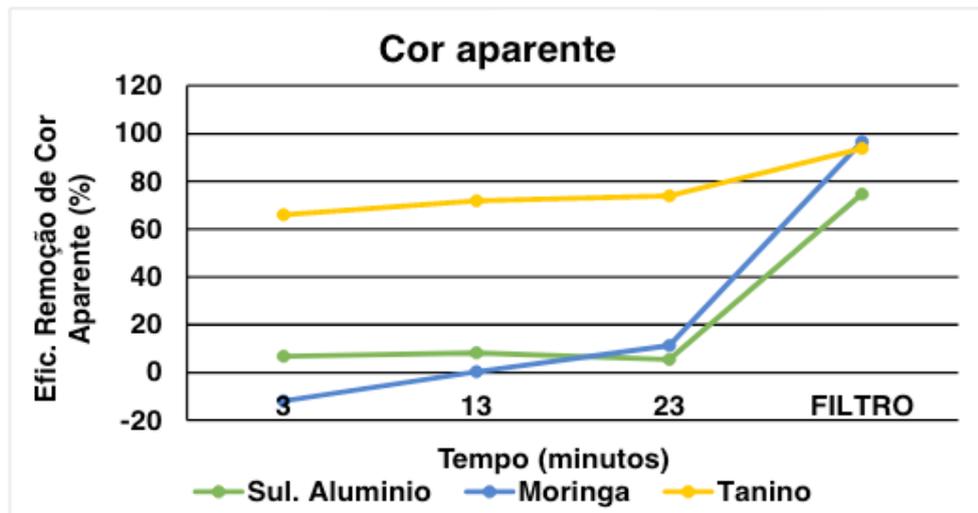


Figura 3. Comportamento da eficiência de remoção de turbidez (a) e cor aparente (b) no decorrer do ensaio.

Para a turbidez, aplicando-se o teste de Turkey, os coagulantes Tanino e a *Moringa oleífera* apresentaram variação significativa em comparação com o Sulfato de Alumino, no instante após a passagem pelos filtros. Para o parâmetro cor aparente, aplicando-se o mesmo teste, não houve variação significativa entre nenhum dos coagulantes.

#### 4 | CONCLUSÕES

Analisando as combinações entre os coagulantes e o filtro pode-se afirmar que todos alcançaram resultados positivos no tratamento da água. Importante destacar a associação dos coagulantes naturais, em destaque a *Moringa oleífera*, onde gerou-se os melhores resultados, o que vem comprovar a eficiência da associação dos filtros às amostras de água de abastecimento tratadas com coagulantes naturais.

#### 5 | AGRADECIMENTO

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná por ceder suas instalações e equipamentos para as atividades realizadas, e à Universidade Estadual de Campinas doadora das sementes de *Moringa oleífera*.

#### REFERÊNCIAS

BRASIL. **Portaria n.º 2914**, Ministério da Saúde, de 12 de dezembro de 2011, Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, nº 239, de 14 dez. 2011, Seção 1, página 39/46.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos E Técnicas de Tratamento de Água** - 2 Volumes, Editora RiMa, 2ª Ed., 2005.

DI BERNARDO, L. et al. **Tratamento de Água para Abastecimento por Filtração direta**. Luiz Bernardo (coordenador) – Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003. Projeto PROSAB 468 p.

MACEDO, J.A.B. **Águas & Águas**. 3º Ed. Minas Gerais: CRQ - MG, 2007.

THEODORO, J.D. P. **Estudo dos mecanismos de coagulação/floculação para a obtenção de água de abastecimento para o consumo humano**. 2012. 184f. Tese (Doutorado em Engenharia Química, área de desenvolvimento de processos) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá. 2012.

## AUTOMATIZAÇÃO DE BRAÇO ROBÓTICO PARA COLETA EM CORPOS HÍDRICOS COM CONTAMINANTES NOCIVOS A SAÚDE HUMANA

**Louise Aimeé Reis Guimarães**

Faculdade Estácio de Belém  
Belém – Pará

**Jussiléa Gurjão de Figueiredo**

Faculdade Estácio de Belém  
Belém – Pará

**Ylan Dahan Benoliel Silva**

Faculdade Estácio de Belém  
Belém – Pará

**RESUMO:** Este trabalho visa realizar a automatização da coleta de efluentes em corpos hídricos, pois as áreas de estudo podem apresentar altas taxas de concentração de contaminantes prejudiciais à saúde dos seres humanos, devido ao despejo ilegal, bem como derramamento advindo das indústrias. Desse modo, foi desenvolvido um protótipo de dispositivo, que consiste em um braço robótico para executar a coleta de amostras da água sem que os pesquisadores entrem em contato direto com o meio. O material do braço robótico é constituído de acrílico, nos quais servos motores estão conectados auxiliando na movimentação das articulações do braço, e para o envio dos comandos é utilizada a placa *Wemos D1 Mini*. Por conseguinte, será possível ponderar os níveis de impactos ambientais dos locais de observação e, assim, verificar se a legislação

vigente, estabelecida pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) como forma de referência ambiental, está sendo aplicada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Braço robótico, Gestão Ambiental, MeArm, Placa Wemos D1 Mini.

**ABSTRACT:** This work aims to automate the collection of effluents in water bodies, since they may present high concentrations of contaminants harmful to human health, due to the illegal dumping, as well as spill from the industries. Thus, a prototype device was developed, consisting of a robotic arm to perform the collection of water samples without the researchers coming into direct contact with the area. The material of the robotic arm consists of acrylic, in which servo motors are connected assisting in the movement of the arm's articulations, and to send commands the Wemos D1 Mini board is used. Therefore, it will be possible to assess the environmental impact levels of the observation sites and verify whether existing legislation, established by the National Environment Council of Brazil, as an environmental reference, is being applied.

**KEYWORDS:** Environmental Management, MeArm, Robotic arm, Wemos D1 Mini Board.

## 1 | INTRODUÇÃO

O crescimento das zonas urbanas, desprovidas de uma infraestrutura adequadamente planejada e o avanço de indústrias em direção às áreas naturais, se viram cada vez mais às voltas com problemas relacionados à poluição, enfrentam questões associadas a destinação incorreta do lixo orgânico e de dejetos, nas ruas e em esgotos a céu aberto, e terrenos sem qualquer tipo de preparação para o recebimento de rejeitos (KLUCZKOVSKI, 2015). DERISIO (2012) indica que a poluição das águas pode ocorrer por meio de lançamento de despejos industriais provenientes das operações desenvolvidas nos diferentes processamentos industriais e a poluição por causa de esgotos domésticos, os quais resultam do uso da água para fins higiênicos, preparo de alimentos, lavagem de pisos e utensílios.

Os efluentes, por exemplo, possuem características poluidoras como a presença de substâncias inorgânicas que podem afetar o equilíbrio de ecossistemas. Embora a maior parte seja tratada em estações de tratamento de esgotos (ETEs), um percentual considerável poderá ser despejado de forma irregular no meio ambiente, devido a fatores como tubulações danificadas, despejo ilegal por ação humana e a formação de esgotos a céu aberto. Tudo isto ocorre mesmo mediante as normas de proteção e preservação do meio ambiente, como a Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 (Brasil, 1998), que dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente (KLUCZKOVSKI, 2015).

O derramamento de esgoto doméstico ou industrial em rios é considerado crime ambiental grave, como consequência, há a mortalidade dos peixes e à proliferação excessiva de micro-organismos, ocasionando o desequilíbrio no ecossistema local. A água contaminada também pode trazer consigo patógenos e outros microrganismos que se desenvolvem com a decomposição da matéria orgânica presente no meio diluído, o que a torna perigosa para o contato direto do ser humano, quando há necessidade de realizar estudos no âmbito de análises laboratoriais de cargas orgânicas.

Os procedimentos de coleta e metodologias padrões para análise de águas, devido à proximidade do ser humano com um ambiente possível contaminando, podem trazer riscos à saúde dos profissionais que realizam esse tipo de estudo.

Nesse sentido, notou-se há necessidade de desenvolver um protótipo para auxiliar profissionais da área ambiental e analistas químicos no processo de coleta de efluentes, visando contribuir em estudos relacionados à qualidade dos corpos hídricos poluídos sem causar danos à saúde do especialista, possibilitando também a modernização da tarefa de coleta do material.

## 2 | DESENVOLVIMENTO E DEMONSTRAÇÃO DOS RESULTADOS

### 2.1 METODOLOGIA

O projeto baseia-se na modelagem por meio da prototificação de uma estrutura que representará um sistema de atuação automatizada. Para atendimento da demanda, faz-se necessário o levantamento dos requisitos como forma de assistência do desenvolvimento do protótipo.

O objetivo geral é o desenvolvimento do protótipo do braço robótico e estrutura de movimentação, no qual auxiliará na coleta de amostras de corpos hídricos, e no emprego do atuador para automatização do processo.

Em vista disso, o braço robótico poderá atuar em uma zona de convívio urbano, auxiliando o especialista na coleta de amostras para análise de parâmetros físico-químicos e microbiológicos, em que os principais parâmetros a serem analisados são: pH, condutividade, demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Oxigênio Dissolvido (OD) e coliformes termotolerantes.

O primeiro passo foi à pesquisa por demanda tecnológica existente para mecanismos de braços robóticos e um estudo aprofundado sobre as características que satisfaçam o objetivo do projeto. A fase de estudos e análise objetivou avaliar a melhor forma de comunicação entre a estrutura do braço, com os servos motores acoplados, e o computador. Nesta etapa foram classificadas as características dos módulos de desenvolvimento, considerando alguns aspectos como velocidade de comunicação, facilidade de manipulação e de prototificação.

A comunicação com os servos motores, para realização do envio de comandos, ocorre por meio de portas *Pulse Width Modulation* (PWM). Dessa forma, foi optado o módulo *wireless Wemos D1 Mini*, com protocolo de dados seriais síncronos utilizados em microcontroladores para comunicação com um ou mais periféricos, e conversor analógico digital. Posteriormente, com a conclusão da atividade de montagem da estrutura do braço, incluindo a parte de comunicação, houve a verificação das medidas e possíveis ajustes do braço.

A idealização eletrônica do projeto começou com o estudo de componentes atuadores que exerceriam a função de movimentação do sistema proposto. Desta forma, o levantamento dos requisitos eletrônicos do projeto compreendeu as necessidades que o sistema demandava, como a fonte de alimentação para a placa *Wemos D1 Mini* e a tensão de entrada para funcionamento dos servos motores.

Após a aquisição dos componentes eletrônicos, os servos motores que atuam como reguladores de movimentos das articulações do braço robótico, foram alinhados com a estrutura mecânica e a placa *Wemos D1 Mini*, havendo calibragem no Laboratório de Automação, Controle e Robótica da Faculdade Estácio de Belém.

O desenvolvimento do software do projeto, por meio de um site estruturado em HTML, seguiu os passos da engenharia de software, considerando as etapas do ciclo

de vida do software. As etapas a serem seguidas foram: a análise e especificação de requisitos; projeto; implementação; teste; operação e manutenção.

Na primeira fase compreendeu as especificações das tarefas. O resultado dessa análise descreveu as funcionalidades do software, dados e informações utilizadas, além dos resultados esperados. O segundo momento interpretou as características do software: estruturas de dados necessárias e detalhes dos procedimentos. A terceira fase foi a codificação dos documentos das fases anteriores.

## 2.2 BRAÇO ROBÓTICO MEARM

O projeto do braço robótico *MeArm* é uma iniciativa *open development* e *open hardware* (INSTRUCTABLES, 2016?). Seus códigos e cortes de peças estão disponíveis na íntegra no *GitHub* do projeto, facilitando o acesso da comunidade ao mesmo. Quando comparado a outros modelos de braços robóticos presentes no mercado *closed source*, sem a possibilidade de alterações nas peças, este protótipo apresenta fácil operabilidade. Em vista disso, a opção de estrutura de braço *MeArm* foi a mais praticável dentro dos prazos e orçamento do projeto.

Houve a necessidade de modelagem e duplicação de uma das peças do braço, pois a equipe responsável pela montagem notou a ausência da mesma. Para isso, com auxílio dos membros do Laboratório de Tecnologia Assistiva (LABTA), vinculado a Universidade do Estado do Pará (UEPA), obteve-se a peça desejada a partir da utilização de peças de policloreto de polivinila (PVC), que são aquecidas em fogo, de modo que fiquem dispostas na forma de placa, técnica conhecida como Técnica de Rodrigues. Então, desenha-se o formato da peça desejada e a coloca no moto esmeril, ferramenta utilizada para correções na proporção da peça, figura 1.



Figura 1. Corte e confecção da peça no PVC.

Fonte: Laboratório de Tecnologia Assistiva (LABTA).

A peça duplicada ganha destaque no braço estruturado, figura 2, seguindo as mesmas proporções do projeto. A primeira parte da montagem do braço, o envio de comandos e alimentação dos servos motores era realizado por meio do

microcontrolador *open source* e *open hardware* *Arduino Uno*. Entretanto, os envios de dados e instruções do *Arduino* para os servos são de modo serial, não satisfazendo os requisitos obrigatórios do projeto, no qual há necessidade da utilização de protocolos de rede.

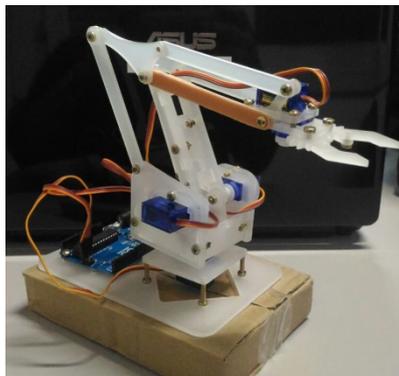


Figura 2. Corte e confecção da peça no PVC.

Fonte: Autores.

A segunda parte constituiu na substituição do microcontrolador *Arduino* pela placa *Wemos D1 Mini*, na qual realiza a comunicação *wireless* entre a estrutura do braço robótico com computadores, pois esta placa possui o chip *Wi-Fi ESP8266EX*. Na figura 3, identifica-se a nova ligação entre a placa *Wemos D1 Mini* com servos acoplados no braço.

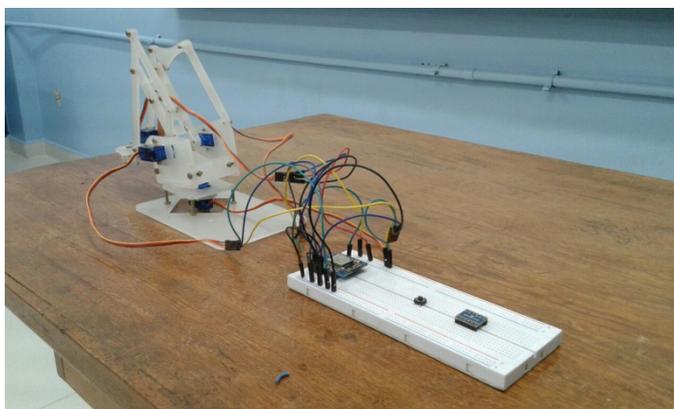


Figura 3. Placa *Wemos D1 Mini* conectada ao braço.

Fonte: Autores.

## 2.3 SITE EM HTML

A partir do desenvolvimento do projeto, notou-se a necessidade da estruturação dos resultados, bem como o controle do braço robótico, em uma plataforma disponível para comunidade. Com a finalidade das disposições dos dados e envio de comandos para o braço, foi optado por utilizar-se de uma estrutura em HyperText Markup Language (HTML).

A linguagem HTML é considerada uma linguagem de marcação, pois é formada

por textos e códigos especiais conhecidos como marcas ou tags. Esses comandos indicam partes da página e também produzem diferentes efeitos no navegador (SEGURADO, 2016).

A fim de haver o desenvolvimento visual da estrutura em HTML foi necessária a utilização do Cascading Style Sheets (CSS). Cascading Style Sheets é a linguagem voltada para a criação de folhas de estilo, ou seja, para o conjunto de regras responsáveis pela aparência de um site (SEGURADO, 2016). O CSS descreve como o HTML deverá dispor os seus elementos na tela ou em outras mídias. Também é usado na definição do estilo das páginas web, incluindo o design, layout e variações no display para diversos formatos e tamanhos de telas (W3SCHOOLS, 2017?).

Desse modo, o emprego de HTML com CSS foi alternativa viável junto aos prazos do cronograma do projeto, haja vista que a linguagem possibilita fácil manipulação de tags, uma vasta comunidade com bibliotecas open source e não há necessidade de um ambiente de desenvolvimento integrado.

Em vista disso, foi manipulada uma biblioteca open source para HTML com CSS, disponível na CodePen, visando uma melhor inserção e disposição das informações. Os ícones que são utilizados para compor a estrutura do HTML foram retirados de uma base de ícones livres, por meio da ferramenta Flaticon. Na figura 4, observa-se a tela inicial do projeto, que poderá conter uma mensagem de boas vindas ao ambiente. Todos os ícones vetorizados do site do projeto são de repositórios online grátis.



Figura 4. Disposição da tela inicial.

Fonte: Autores.

## 2.4 PLACA WEMOS D1 MINI

O projeto interdisciplinar do braço robótico desenvolvido na Faculdade Estácio de Belém, vinculado ao curso de engenharia de computação, possui como requisito obrigatório o tópico de redes. Logo, a comunicação dentro do projeto deveria possuir a geração de protocolos de comunicação em rede.

Por conseguinte, houve a definição da utilização da placa *Wemos D1 Mini*, figura

5, indicada para utilização em projetos de internet das coisas e desenvolvimento de projetos eletrônicos em geral, contando com o chip *WiFi ESP8266EX* (FILIFEFLOP, 2017?).



Figura 5. Placa de desenvolvimento *Wemos D1 Mini*.

Fonte: FilipeFlop.

Haja vista que a placa de desenvolvimento *Wemos D1 Mini* utiliza chip *Wi-Fi*, o protocolo que é gerado na comunicação neste projeto é o padrão IEEE 802.11n.

O protocolo IEEE 802.n faz parte do conjunto de protocolos utilizados nas Redes *Wi-Fi*, ou seja, nas redes sem fio, que têm sido utilizadas para atender as necessidades das redes locais, tanto no âmbito residencial como no corporativo de pequeno, médio e grande porte (NASCIMENTO *et al.*, 2012).

## 2.5 COMUNICAÇÃO NO SISTEMA

Na estruturação do projeto do braço robótico, os servos motores são os agentes reguladores dos movimentos das articulações. Assim, há necessidade de um módulo atuador, no qual enviará informações de controle aos servos. Visando alcançar o melhor desempenho de comunicação, foram analisadas opções de *shields* para o microcontrolador *Arduino*, extensões e módulos de desenvolvimento. Considerando alguns aspectos como performance de comunicação, facilidade de manuseio e de prototificação, optou-se pelo uso do módulo *Wemos D1 Mini*.

O seu tipo de comunicação gera protocolos padrão IEEE para redes *wireless*. Sendo assim, o módulo necessita estar conectado a uma rede sem fios através de um roteador para o envio de dados. Na segunda fase de testes com os servos motores, o módulo *Wemos D1 Mini* foi integrado ao projeto, havendo a necessidade do código *Wiring*, utilizado na IDE do *Arduino*, estar sincronizado com a biblioteca do módulo, disponível no *GitHub*. Uma interface HTML, figura 6, foi desenvolvida para ser utilizada no envio de comandos para os servos motores por meio do módulo.

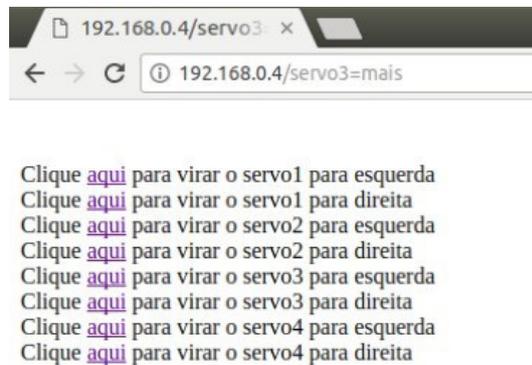


Figura 5. Placa de desenvolvimento Wemos D1 Mini.

Fonte: Autores.

### 3 | CONCLUSÕES

Com o aumento das regiões urbanas brasileiras e áreas conhecidas como “invasões”, na qual sua grande maioria não possuem sistemas de tratamento de esgoto necessário, podendo haver o despejo direto em rios e canais, houve um aumento considerável da poluição destes mananciais. Centros de pesquisas de universidades e empresas particulares realizam estudos do nível da contaminação nessas regiões de risco.

Os profissionais da área biológica e ambiental, que realizam procedimentos de coletas em corpos hídricos, seguem um protocolo padrão para a instrumentação dos utensílios de pesquisa, normalmente havendo o contato direto com o local de estudo contaminado.

O projeto proposto neste artigo, por meio do emprego da prototipação, foi o desenvolvimento de um modelo de braço robótico que auxiliará profissionais que realizam pesquisas em corpos hídricos contaminados. Para a estrutura do braço utilizou-se o modelo *open source MeArm*. Os servos motores acoplados no braço foram integrados com a plataforma desenvolvimento *Wemos D1 Mini*, essa plataforma realiza comunicação wireless.

Os testes que foram realizados no braço estão relacionados ao desempenho da movimentação. A latência está associada com a velocidade de conexão da rede Wi-Fi, na qual o menor tempo de resposta deverá ser diretamente proporcional a uma qualidade melhor da velocidade. Consequentemente, foi averiguado se os comandos endereçados para a plataforma *Wemos D1 Mini* correspondiam com as instruções enviadas pela página web. O erro do movimento foi de aproximadamente 5 segundos.

Em relação os testes da bateria, foram feitos com um conjunto de pilhas para verificar se era possível utilizá-las como fonte de alimentação, criando uma possibilidade de fonte e atendendo o requisito portabilidade para o protótipo.

O projeto possui propostas para melhoramentos futuros, como novas calibrações

da estrutura, visando diminuir o erro do movimento e a elaboração de uma estrutura similar a um barco que será utilizado para o auxílio do deslocamento da estrutura em rios e canais para pesquisas de campo. Desta maneira, com o avanço das pesquisas de campo, será necessário o desenvolvimento de um banco de dados, o qual armazenará os parâmetros físico-químicos e microbiológicos definidos na metodologia do projeto. Os componentes do braço poderão ser substituídos completamente por peças confeccionadas em PVC tubular, processo explicado no tópico 2.2 deste artigo, tornando o braço mais resistente devido à qualidade dos materiais utilizados.

## REFERÊNCIAS

DERISIO, J. C. **Introdução ao Controle de Poluição Ambiental**. 4. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 224 p.

FILIFELOP. **Placa Wemos D1 Mini Pro WiFi ESP8266**. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/produto/placa-wemos-d1-mini-pro-wifi-esp8266/>>. Acesso em: 15 jan. 2019.

INSTRUCTABLES. **Pocket Sized Robot Arm MeArm V0.4**. Disponível em: <<https://www.instructables.com/id/Pocket-Sized-Robot-Arm-meArm-V04/>>. Acesso em: 15 jan. 2019.

KLUCZKOVSKI, A. M. R. G.. **Introdução ao estudo da poluição dos ecossistemas**. 1. ed. Curitiba: InterSaberes, 2015. 276 p.

NASCIMENTO, C. R. et al. **Redes Wi-Fi: O Padrão IEEE 802.11n**. Disponível em: <<http://www.teleco.com.br/pdfs/tutorialwifieee.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2019.

SEGURADO, V. S. (Org.). **Projeto de interface com o usuário**. Brasil: Pearson, 2016. 192 p.

W3SCHOOLS. **CSS Introduction**. Disponível em: <[https://www.w3schools.com/css/css\\_intro.asp](https://www.w3schools.com/css/css_intro.asp)>. Acesso em: 15 jan. 2019.

## AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA ESTRUTURAL DE PÓRTICOS PLANOS DE AÇO PROJETADOS COM ANÁLISE AVANÇADA

### **Danilo Luiz Santana Mapa**

Universidade Federal de Ouro Preto  
Ouro Preto – Minas Gerais

### **Marcílio Sousa da Rocha Freitas**

Universidade Federal de Ouro Preto  
Ouro Preto – Minas Gerais

### **Ricardo Azoubel da Mota Silveira**

Universidade Federal de Ouro Preto  
Ouro Preto – Minas Gerais

**RESUMO:** A análise avançada de pórticos de aço resulta em estruturas mais seguras e econômicas, pois considera o comportamento não linear das estruturas e a capacidade de carga última do sistema estrutural. A aplicação de métodos de análise de confiabilidade possibilita avaliar o nível de segurança de estruturas projetadas com análise avançada em termos probabilísticos, através da avaliação direta da confiabilidade do sistema estrutural. No presente trabalho foi empregado o método analítico FORM (First Order Reliability Method) na avaliação da segurança de pórticos planos de aço considerando a aleatoriedade das variáveis de projeto mais significativas, que são as propriedades do material, os carregamentos externos aplicados e as propriedades geométricas das seções transversais dos perfis de aço. As análises avançadas foram realizadas

via método dos elementos finitos e consideraram a não linearidade geométrica, a não linearidade física do aço e imperfeições geométricas iniciais dos pórticos. Os resultados obtidos para os pórticos planos de aço analisados indicaram que a segurança estrutural é significativamente afetada quando se incorpora na análise de confiabilidade os efeitos não lineares através da análise avançada do sistema estrutural.

**PALAVRAS-CHAVE:** pórticos de aço; análise avançada; confiabilidade do sistema; segurança estrutural; efeitos não lineares.

**ABSTRACT:** Advanced analysis of steel frames results in safer and more economical structures due to the non-linear behavior of the structures and the ultimate load capacity of the structural system are taken into account. Reliability methods allow the evaluation of the safety level of structures designed by advanced analysis in probabilistic terms, by the direct evaluation of the reliability of the structural system. In the present work, the First Order Reliability Method (FORM) was used to evaluate the safety of steel frames taking into account the uncertainties of the most significant design variables, which are the properties of the material, the applied external loads and the geometric properties of the cross sections of the steel profiles. The advanced analyses were performed using the finite element method and considered the geometric

nonlinearities, the inelasticity of the steel and also the initial geometric imperfections of the portal frames. The results obtained for the analyzed steel frames indicated that structural safety is significantly affected when the nonlinear effects are incorporated in the reliability analysis by the advanced analysis of the structural system.

**KEYWORDS:** steel frames; advanced analysis; system reliability; structural safety; nonlinear effects.

## 1 | INTRODUÇÃO

As estruturas de aço são amplamente utilizadas na construção civil por apresentarem alta resistência, boa ductilidade e rápida fabricação e montagem. Atualmente as normas estruturais recomendam procedimentos comuns para o projeto de pórticos de aço que são: realizar a análise estrutural para obtenção dos esforços solicitantes nos elementos da estrutura para todas as combinações de ações; e verificar a segurança estrutural de cada elemento do pórtico para os estados limites especificados nas normas, através do Método dos Estados Limites. No entanto essa abordagem possui inconvenientes, pois as normas permitem a realização de análise elástica dos pórticos de aço sem a consideração direta dos efeitos devidos as não linearidades física e geométrica.

O conceito de análise avançada surgiu com o propósito de superar o inconveniente acima mencionado, através do emprego da análise inelástica (não linearidade física) de segunda ordem (não linearidade geométrica) dos pórticos de aço de forma a considerar todos os efeitos significativos do comportamento estrutural não linear. O projeto por análise avançada utiliza análises estruturais não lineares para prever o desempenho do sistema estrutural.

Recentes avanços na análise estrutural não linear tornaram possível projetar uma estrutura de aço como um sistema, em vez de um conjunto de elementos estruturais independentes. Uma análise inelástica rigorosa pode determinar com precisão as interações complexas entre elementos de um sistema estrutural, e pode capturar o efeito benéfico da redistribuição de esforços que ocorre após a formação de rótulas plásticas, o que leva ao projeto de estruturas mais leves e econômicas.

No entanto, o progresso relatado na área de análise estrutural não foi acompanhado por um progresso na verificação da segurança estrutural, pois o Método dos Estados Limites continua sendo amplamente empregado, embora suas limitações sejam conhecidas (Ellingwood *et al.*, 1982). A formação da primeira rotula plástica em um elemento individual da estrutura, verificada nos estados limites últimos, não conduz necessariamente à falha de todo o sistema estrutural, devido à redundância da estrutura ou à redistribuição de esforços. Há uma diferença evidente entre o nível de confiabilidade do sistema estrutural e os níveis de confiabilidade dos elementos estruturais, porque a capacidade estrutural relaciona-se não apenas com as

capacidades dos elementos individuais, mas também com a ductilidade e redundância estrutural (Hendawi & Frangopol, 1994).

O Método dos Estados Limites utiliza coeficientes parciais de segurança aplicados sobre as ações atuantes e sobre as resistências nominais, entretanto, o uso desses coeficientes não permite o conhecimento do nível de segurança do sistema estrutural em serviço. Embora este método esteja consolidado e seja bem aceito por projetistas na verificação da segurança estrutural, é apropriado avaliar a segurança de estruturas usando métodos de confiabilidade mais avançados.

Segundo Madsen *et al.* (2006), os métodos de confiabilidade estrutural são divididos em níveis. O método dos estados limites que emprega coeficientes parciais de segurança para cada variável incerta de projeto é classificado como método de nível I. Se for utilizada a função densidade de probabilidade das variáveis incertas para a determinação da probabilidade de falha da estrutura são chamados de métodos de nível III. No presente trabalho foi utilizado método de confiabilidade de nível III na avaliação dos níveis de segurança das estruturas, utilizando-se análise estrutural avançada. O método de nível III empregado no presente trabalho permite conhecer o real nível de segurança de estruturas, usualmente projetadas por métodos de nível I.

Embora a norma brasileira NBR 8800 (ABNT, 2008) disponibilize diretrizes para o projeto de estruturas por meio de análise avançada, em nenhuma pesquisa anterior incorporou-se nessa análise a aleatoriedade das variáveis de projeto e avaliou-se o nível de segurança de pórticos de aço projetados por análise avançada.

O objetivo geral é apresentar e discutir os resultados das análises de confiabilidade estrutural de exemplos de estruturas planas de aço via análise estrutural avançada, considerando o comportamento não linear geométrico e a não linearidade física do aço. Foi utilizada nas análises de confiabilidade a ferramenta computacional desenvolvida por Mapa (2016), que emprega o método analítico FORM (*First Order Reliability Method*) para avaliar a probabilidade de falha da função de desempenho formulada para estado limite último relacionado ao colapso plástico.

## 2 | CONFIABILIDADE ESTRUTURAL

Na análise de confiabilidade estrutural, a máxima solicitação,  $S$ , e a resistência disponível,  $R$ , são modeladas por variáveis aleatórias. O objetivo da análise de confiabilidade é assegurar o evento ( $R > S$ ) durante toda vida útil da estrutura em termos de probabilidade.

A falha ocorre se  $R$  for menor do que  $S$  e esse evento pode ser representado em termos de probabilidade como  $P(R < S)$ . Para as variáveis aleatórias  $R$  e  $S$  com distribuições de probabilidade conhecidas, contínuas e estatisticamente independentes, a probabilidade de falha  $P_f$  pode ser calculada através da seguinte expressão (Ang & Tang, 1984):

$$P_f = P(R < S) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{S > R} f_R(r) \cdot f_S(s) \cdot dr \cdot ds = \int_0^{\infty} F_R(s) f_S(s) ds \quad (1)$$

O cálculo da probabilidade de falha utilizando a Eq. (1) requer que as funções densidade de probabilidade  $f_R(r)$  e  $f_S(s)$  sejam conhecidas. Na prática, essa informação nem sempre está disponível ou é difícil de ser obtida. Mesmo quando as funções de probabilidade são conhecidas, a avaliação numérica da Eq. (1) pode ser impraticável.

Se ambas as variáveis aleatórias  $R$  e  $S$  possuem distribuição normal e são estatisticamente independentes, então a variável aleatória  $Z$  pode ser introduzida como  $Z = R - S$ . Então a Eq. (1) pode ser utilizada para definir a probabilidade de falha como:

$$P_f = P(Z < 0) = \int_{-\infty}^0 f_Z(z) \cdot dz = \Phi\left(\frac{0 - \mu_Z}{\sigma_Z}\right) = \Phi(-\beta_c) \quad (2)$$

Sendo  $\mu_Z = \mu_R - \mu_S$ ,  $\sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$ ,  $\Phi$  é a função distribuição cumulativa da distribuição normal padrão e  $\beta_c$  é o índice de confiabilidade de Cornell (1969), definido a seguir:

$$\beta_c = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (3)$$

O índice de confiabilidade  $\beta_c$  foi introduzido na tentativa de se evitar as dificuldades conceituais e práticas decorrentes do uso da Eq. (1). Em sua implementação inicial, o índice de confiabilidade foi avaliado simplesmente em função das médias e dos desvios-padrão da resistência e da solicitação máxima, como indicado na Eq. (3). Posteriormente, o índice de confiabilidade passou a ser obtido por métodos analíticos baseados em aproximações em séries de Taylor de primeira ordem (método analítico FORM).

## 2.1 Método analítico FORM

No método FORM (*First-Order Reliability Method*), as variáveis aleatórias  $U$ , cujas distribuições são quaisquer e podem ser dependentes entre si ou não, são transformadas em variáveis  $V$  normais padrão estatisticamente independentes, sendo a função de falha  $G(U)$  escrita no espaço das variáveis reduzidas (espaço  $V$ ) como  $g(V)$ . Depois disto, a superfície de falha definida por  $g(V) = 0$  é aproximada por uma superfície linear (ou hiperplano) no ponto com a menor distância até a origem, identificado como  $V^*$  (ponto de projeto no espaço das variáveis reduzidas).

Uma das etapas desse método é a transformação das variáveis  $U$  com distribuições quaisquer em variáveis  $V$  normais padrão estatisticamente independentes. Utiliza-se comumente a transformação de Nataf (Melchers, 1999) definida por:

$$V = \Gamma \sigma^{-1} (U - m) \quad (4)$$

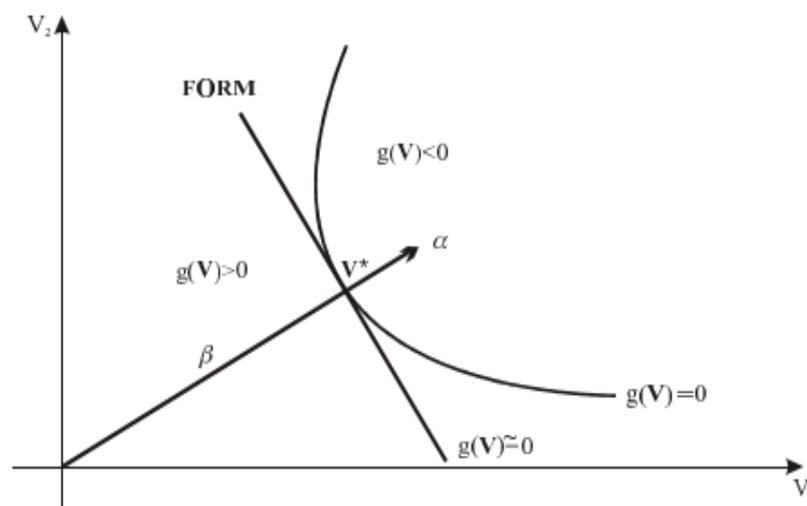
Sendo  $m$  o vetor com as médias das variáveis  $U$ ,  $\sigma$  a matriz diagonal contendo os desvios padrão das variáveis  $U$  e  $\Gamma = L^{-1}$ , sendo  $L$  a matriz triangular inferior obtida da decomposição de Choleski da matriz dos coeficientes de correlação de  $U$ . Outra etapa importante desse método é a busca ao ponto sobre a superfície de falha mais próximo à origem do sistema reduzido, também denominado ponto de projeto  $V^*$ . Para encontrar o ponto de projeto, formula-se um problema de otimização  $P$  com uma restrição, tal que:

$$\begin{aligned} P: & \text{minimizar } |V| \\ & \text{Sujeito a } g(V) = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Utiliza-se comumente o algoritmo denominado HLRF, desenvolvido por Hasofer & Lind (1974) e aprimorado por Rackwitz & Fiessler (1978), para resolução do problema de otimização apresentado pela Eq. (5). O processo iterativo gerado pelo algoritmo HLRF caminha em busca do ponto resolvendo-se a seguinte equação:

$$V^{i+1} = \frac{1}{|\nabla g(V^i)|^2} \left[ \nabla g(V^i)^T V^i - g(V^i) \right] \cdot \nabla g(V^i) \quad (6)$$

Durante o processo iterativo determina-se o índice de confiabilidade  $\beta$  calculando-se a norma do vetor  $V^{i+1}$  e interrompe-se o processo quando a variação relativa do valor de  $\beta$  é inferior a uma tolerância estabelecida. De posse do índice de confiabilidade  $\beta$ , a probabilidade de falha pode ser obtida utilizando-se a Eq. (2). A Figura 1 fornece uma representação gráfica do método analítico FORM, indicando a aproximação linear da função de falha em  $V^*$  e o índice de confiabilidade  $\beta$ .



### 3 | ANÁLISE ESTRUTURAL AVANÇADA

O emprego crescente de elementos estruturais leves e esbeltos e solicitações próximas à resistência limite do material tornam necessária a utilização de ferramentas avançadas de análise de estruturas. A análise avançada de estruturas é caracterizada quando efeitos não lineares são considerados na formulação do elemento estrutural. Dentre as fontes de não linearidade cita-se a não linearidade geométrica e a não linearidade física do material.

O comportamento não linear pode ser produzido por mudanças na geometria do pórtico durante o carregamento (Figura 2), o que é comumente referido na literatura como não linearidade geométrica ou efeitos de segunda ordem. Os principais efeitos geométricos relacionados à não linearidade geométrica são o efeito global  $P-\Delta$  como resultado dos deslocamentos laterais na estrutura, e o efeito local  $P-\delta$  nos elementos, associado com deformações locais relativas à corda entre os extremos do elemento.

Uma análise de segunda ordem rigorosa deve combinar os efeitos da teoria de grandes deslocamentos (equilíbrio analisado no estado deformado da estrutura) e o efeito da carga axial na rigidez dos elementos (cargas axiais incrementam as deformações laterais locais dos elementos). De forma a viabilizar essa análise de segunda ordem é necessário empregar formulações numéricas adequadas para sua consideração na aplicação do método dos elementos finitos (Silva, 2009).

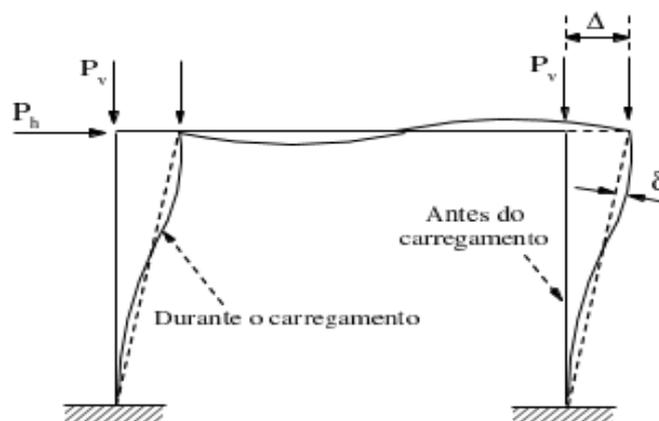


Figura 2. Representação gráfica dos efeitos  $P-\Delta$  e  $P-\delta$

Fonte: (Silva, 2009)

Outra fonte de não linearidade que deve ser considerada em uma análise estrutural avançada diz respeito a inelasticidade (não linearidade física) do material. Sabe-se que além do comportamento elástico, o aço também se comporta de forma inelástica. A inelasticidade do aço é o processo de escoamento das fibras causando alterações na distribuição de tensões na seção transversal do elemento à medida

que os esforços internos atuantes nele aumentam. Essa característica favorece a redistribuição de esforços após a formação de rótulas plásticas. Por simplificação, o aço é idealizado como um material elástico-perfeitamente plástico e a Figura 3 apresenta o comportamento tensão deformação para esse caso.

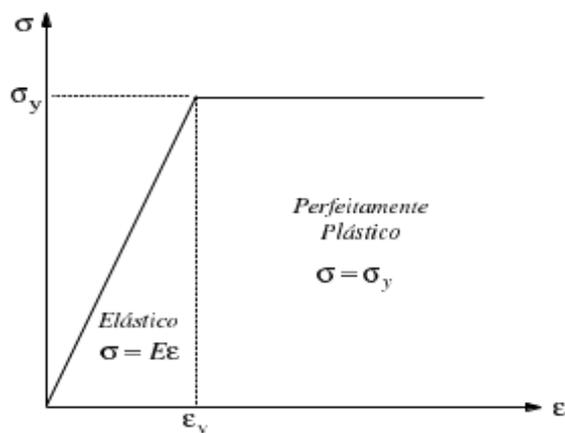


Figura 3. Diagrama tensão-deformação idealizado do aço

Fonte: (Silva, 2009)

A Figura 4a representa um pórtico plano no regime elástico. Com o acréscimo de carga, inicia-se a sequência de formação de rótulas plásticas, indicada na Figura 4b pela numeração de 1 a 4. Ao se atingir a carga limite última ocorre o desenvolvimento da quarta rótula plástica e acontece o mecanismo de colapso plástico do pórtico, no qual a estrutura passa a se deformar indefinidamente sem nenhum incremento de carga.

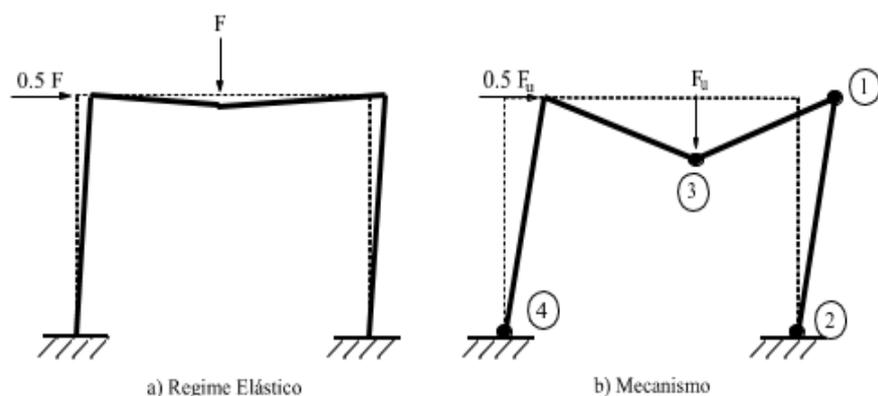


Figura 4. Mecanismo em um pórtico plano

Fonte: (Gonçalves, 2013)

A Figura 5 apresenta as respostas obtidas por diferentes métodos de análise estrutural de um pórtico metálico plano com ligações rígidas e sob a ação de carregamentos crescentes. A análise inelástica de segunda ordem, que considera as não linearidades física e geométrica simultaneamente, é o tipo de análise mais representativa do comportamento e da resistência de um sistema estrutural, sobretudo

devido as complexas interações entre os membros estruturais e as redistribuições de esforços subsequentes a formação de rótulas plásticas.

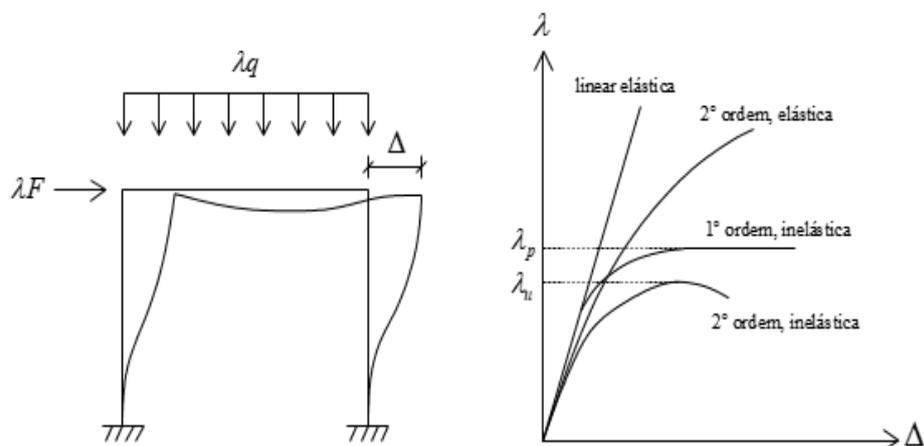


Figura 5. Respostas obtidas para por diferentes métodos de análise estrutural

Fonte: (Autor, 2018)

### 3.1 Sistema computacional CS-ASA

Para realização da análise estrutural avançada dos pórticos planos de aço foi adotado o sistema computacional CS-ASA desenvolvido por Silva (2009) em linguagem Fortran 95. O CS-ASA (*Computational System for Advanced Structural Analysis*) realiza análises numéricas avançadas estáticas e dinâmicas de estruturas baseado no método dos elementos finitos e foi utilizado no presente estudo para obtenção da carga limite que leva as estruturas ao colapso plástico, considerando os efeitos da não linearidade geométrica e da não linearidade física do aço.

Nas análises estruturais não lineares dos pórticos foi utilizada a formulação plástica refinada proposta por Liew *et al.* (1993) presente no CS-ASA (Silva, 2009), estratégia de incremento constante do parâmetro de carga, estratégia de iteração a carga constante, fator de carga incremental fixado em 1% do carregamento total, 1000 incrementos de carga, adotado o método de Newton-Raphson padrão como estratégia de solução não linear.

## 4 | FUNÇÃO DE DESEMPENHO

A segurança de uma estrutura precisa ser avaliada com relação a critérios de desempenho pré-determinados. Os critérios de desempenho são geralmente expressos na forma de funções de estado limite, que são relações funcionais entre todos os efeitos de carga e parâmetros relacionados a resistência. A função de estado limite último define a segurança contra carregamentos extremos durante a vida útil da estrutura.

Na análise da confiabilidade de estruturas complexas, as funções de desempenho (equações de estados limites) geralmente são funções implícitas das

variáveis aleatórias. No presente trabalho, as análises de confiabilidade realizadas foram uma combinação do método de análise de confiabilidade FORM e o método dos elementos finitos determinístico implementado no CS-ASA (Silva, 2009). A análise de confiabilidade dos pórticos planos foi realizada pela ferramenta computacional desenvolvida por Mapa (2016), que possui funcionamento acoplado ao CS-ASA para avaliações do estado limite último a cada iteração do método analítico FORM.

A função de desempenho foi formulada em função da resistência ( $R$ ) limite última do sistema estrutural e em função da solicitação ( $S$ ) atuante no sistema estrutural. No presente trabalho propõe-se que a função de desempenho seja formulada conforme a Eq. (7) a seguir:

$$G(U) = 1 - \frac{S}{R} = 1 - \frac{1}{\lambda} \quad (7)$$

Na Equação (7) a resistência global da estrutura foi expressa em função de um fator adimensional de carga  $\lambda = R / S$ , que fornece quantas vezes a resistência ao colapso plástico da estrutura é maior do que a solicitação atuante, com base em análise inelástica de segunda ordem da estrutura. Esse fator também pode expressar a solicitação necessária para formação da primeira rótula plástica no sistema estrutural.

## 5 | EXEMPLOS NUMÉRICOS

Serão apresentados nesta seção os resultados da análise de confiabilidade estrutural de duas estruturas planas de aço. As análises de confiabilidade foram realizadas mediante o emprego da ferramenta computacional desenvolvida por Mapa (2016), que possibilitou avaliar os níveis de segurança dos estados limites últimos das estruturas.

No primeiro exemplo serão apresentados os resultados da análise de confiabilidade do pórtico plano de Vogel (1985), visando conhecer o nível de segurança da estrutura quando projetada pela norma NBR 8800 (ABNT, 2008). No segundo exemplo será apresentada uma viga contínua de três vãos com capacidade significativa para redistribuição de carga inelástica, onde foram investigados os níveis de segurança com relação ao colapso plástico da viga e com relação à formação da primeira rótula plástica na estrutura, visando conhecer o nível de segurança da estrutura quando projetada pela norma ANSI 360 (AISC, 2010).

### 5.1 Pórtico de Vogel

Neste exemplo foi investigada a segurança estrutural com relação ao estado limite último (Equação 7) do pórtico plano de Vogel (1985) apresentado na Figura 6, onde são mostradas a geometria, o carregamento atuante e as condições de apoio.

O pórtico é composto por perfis laminados europeus HEB 300 para os pilares e perfil HEA 340 para a viga. Todos os perfis são feitos do mesmo material: aço com tensão de escoamento de 235 MPa e módulo de elasticidade longitudinal igual a 200 GPa.

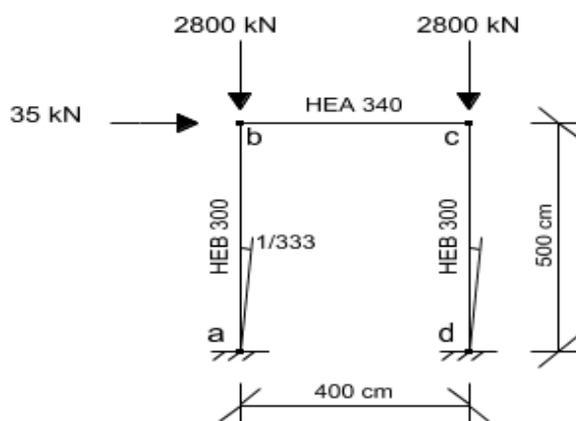


Figura 6. Pórtico de Vogel (1985)

Fonte: (Autor, 2018)

Seguindo as prescrições da norma brasileira NBR 8800 (ABNT, 2008), foram consideradas imperfeições geométricas globais iguais a  $h/333$  no topo do pórtico, sendo  $h$  a altura total do pórtico. É assumido que o momento fletor resistente dos elementos seja igual ao momento de plastificação total da seção transversal, pois considera-se que a viga e os pilares são adequadamente contidos lateralmente e as seções transversais dos perfis são compactas.

O fator de carga última relacionado ao colapso do pórtico encontrado por análise estrutural inelástica de segunda ordem foi de  $\lambda=0,862$ . Lavall *et al.* (2013) também realizaram a análise avançada desse pórtico conforme prescrições da NBR 8800 (ABNT, 2008) e chegaram à mesma conclusão de que o pórtico suporta aproximadamente 86,2% do carregamento total aplicado na Figura 6.

De modo a investigar os níveis de segurança do pórtico com relação ao colapso da estrutura, foram realizadas análises de confiabilidade considerando oito variáveis aleatórias, cuja descrição estatística se encontra na Tabela 1. Na Tabela 2 são resumidos os índices de confiabilidade obtidos por análise inelástica de segunda ordem do pórtico, para 100%, 86,2% e 72,3% do carregamento total mostrado na Figura 6.

Variável	Unidade	Valor nominal	Valor médio	Coefficiente de variação	Tipo de distribuição
$E$	$MPa$	200000,00	200000,00	0,06	Lognormal
$F_y$	$MPa$	235,00	246,75	0,10	Lognormal
$A_{viga}$	$cm^2$	133,50	133,50	0,05	Lognormal
$I_{viga}$	$cm^4$	27690,00	27690,00	0,05	Lognormal
$Z_{viga}$	$cm^3$	1850,00	1850,00	0,05	Lognormal
$A_{colunas}$	$cm^2$	149,10	149,10	0,05	Lognormal
$I_{colunas}$	$cm^4$	25170,00	25170,00	0,05	Lognormal
$Z_{colunas}$	$cm^3$	1869,00	1869,00	0,05	Lognormal

Tabela 1. Descrição estatística das variáveis aleatórias

Nível de carregamento	Índice de confiabilidade ( $\beta$ )
100%	-0,179
86,2%	1,343
72,3%	3,113

Tabela 2. Índices de confiabilidade obtidos para o pórtico de Vogel

Os índices de confiabilidade obtidos via análise avançada do pórtico mostrados na Tabela 2 indicam probabilidades de falha de 57,100% para 100% do carregamento, 8,964% para 86,2% do carregamento e 0,093% para 72,3% do carregamento. Resultados idênticos foram obtidos por Mapa *et al.* (2019), onde foram verificados os estados limites últimos dos pilares do pórtico. O pórtico apresenta capacidade de redistribuição de carga limitada (falhou com pouca ação inelástica) e os resultados obtidos pela avaliação da confiabilidade do sistema estrutural são idênticos aos resultados obtidos pela avaliação da confiabilidade dos elementos estruturais.

Seguindo as prescrições da NBR 8800 (ABNT, 2008) verificou-se que o pórtico se encontra seguro para 86,2% do carregamento total aplicado, mas através da análise de confiabilidade do estado limite último foi possível conhecer o real nível de segurança da estrutura para esse nível de carregamento determinístico. Se a confiabilidade desejada para o pórtico fosse uma probabilidade de falha menor que 0,1% ( $\beta > 3,1$ ), observa-se na Tabela 2 que o carregamento aplicado na estrutura não poderia exceder 72,3% do carregamento total mostrado na Figura 6.

## 5.2 Viga contínua de três vãos

Neste exemplo foi investigada a segurança estrutural com relação ao estado limite último (Equação 7) da viga contínua apresentada na Figura 7, onde são mostradas a geometria, o carregamento atuante e as condições de apoio. A viga é composta por

perfis laminados  $W27 \times 84$  ( $W690 \times 125$ ) no primeiro vão,  $W16 \times 31$  ( $W410 \times 46,1$ ) no segundo vão e  $W18 \times 35$  ( $W460 \times 52$ ) no terceiro vão. Todos os perfis são feitos do mesmo material: aço com tensão de escoamento nominal de  $345 \text{ MPa}$  e módulo de elasticidade longitudinal igual a  $200 \text{ GPa}$ .

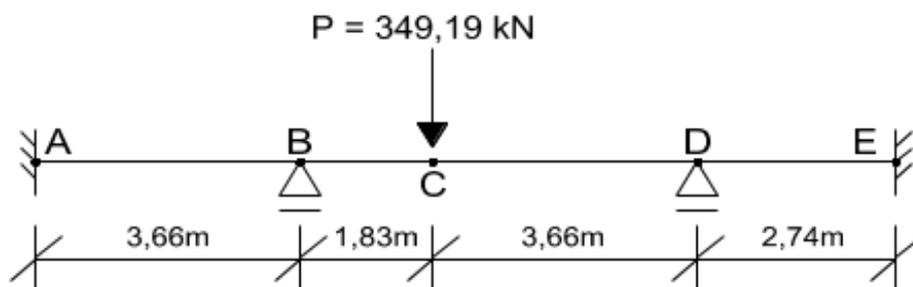


Figura 7. Viga contínua de três vãos

Fonte: (Autor, 2018)

Realizando a análise inelástica determinística da viga contínua da Figura 7 conforme prescrições da norma americana ANSI 360 (AISC, 2010), verificou-se que a primeira rótula plástica se forma na seção B, com um fator de carga  $\lambda_1=0,981$ , a segunda rótula plástica se forma na seção C com um fator de carga  $\lambda_2=1,20$  e a terceira rótula plástica se forma na seção D com um fator de carga  $\lambda_3=1,29$ . Zhang *et al.* (2018) também realizaram a análise avançada dessa viga e chegaram à mesma conclusão de que a viga contínua suporta aproximadamente 129% do carregamento total aplicado na Figura 7.

De modo a investigar os níveis de segurança da viga contínua com relação ao estado limite último de formação da primeira rótula plástica da estrutura, foram realizadas análises de confiabilidade considerando três variáveis aleatórias, cuja descrição estatística se encontra na Tabela 3. Foi considerado que a carga  $P$  aplicada na seção C da Figura 7 era a soma da carga permanente ( $D$ ) com o carregamento variável ( $L$ ). Os valores nominais dos carregamentos foram assumidos como:  $D_n = 97 \text{ kN}$  e  $L_n = 1,5 \cdot D_n$ . Portanto, o carregamento nominal que solicita a viga será  $P = 1,2 \cdot D_n + 1,6 \cdot L_n = 349,19 \text{ kN}$ .

De modo a investigar também os níveis de segurança da viga contínua com relação ao estado limite último de colapso plástico da estrutura, foram realizadas análises de confiabilidade considerando as mesmas variáveis aleatórias da Tabela 3, porém os valores nominais dos carregamentos foram assumidos como:  $D_n = 125,13 \text{ kN}$  e  $L_n = 1,5 \cdot D_n$ . Portanto, o carregamento nominal que solicita a viga será  $P = 1,2 \cdot D_n + 1,6 \cdot L_n = 450,46 \text{ kN}$ .

Variável	Valor nominal	Valor médio	Coefficiente de variação (COV)	Distribuição	Referência
$D$ (kN)	$D_n$	$1,05.D_n$	0,10	Normal	Ellingwood <i>et al.</i> (1982)
$L$ (kN)	$L_n$	$L_n$	0,25	Ext. Tipo I	Ellingwood <i>et al.</i> (1982)
$F_y$ (MPa)	345,00	379,50	0,06	Lognormal	Bartlett <i>et al.</i> (2003)

Tabela 3. Descrição estatística das variáveis aleatórias

Na Tabela 4 são resumidos os índices de confiabilidade obtidos para os estados limites últimos de formação da primeira rótula plástica e relacionados ao colapso plástico da viga.

Estado limite último	Índice $\beta$ (Presente trabalho)	Índice $\beta$ (Zhang <i>et al.</i> , 2018)
Primeira rótula	4,05	3,90
Colapso plástico	2,95	2,76

Tabela 4. Índices de confiabilidade obtidos para a viga contínua

A confiabilidade alvo para elementos sujeitos à flexão deve estar entre 2,6 à 2,8 para combinações do ASCE-7 (Ellingwood, 2000). Com base nos resultados da análise de confiabilidade da Tabela 4, algumas observações podem ser feitas.

O índice de confiabilidade  $\beta = 4,05$  obtido no presente trabalho indica que se a viga for dimensionada para que não ocorra a formação de nenhuma rótula plástica, a probabilidade de falha do sistema estrutural será de 0,00256%. Já o índice de confiabilidade  $\beta = 2,95$  obtido no presente trabalho indica que se a viga for dimensionada para que não ocorra o colapso plástico, a probabilidade de falha do sistema estrutural será de 0,15889%.

A probabilidade de falha do sistema estrutural para o dimensionamento baseado no colapso plástico é cerca de 62 vezes maior que a probabilidade de falha do sistema estrutural para o dimensionamento baseado na formação da primeira rótula plástica. Zhang *et al.* (2018) também chegaram numa probabilidade de falha cerca de 60 vezes maior para o estado limite último relacionado ao colapso plástico. A diferença entre os índices de confiabilidade encontrados para os estados limites últimos analisados é resultado da capacidade significativa de redistribuição de carga da viga após a formação da primeira rótula plástica.

Porém, observa-se na Tabela 4 que os índices de confiabilidade obtidos no presente trabalho e por Zhang *et al.* (2018) para o estado limite último de colapso plástico é superior a confiabilidade alvo. O dimensionamento com base no colapso plástico deixa pouca reserva de resistência, e portanto, têm-se um melhor aproveitamento do aço no sistema estrutural. Através da análise inelástica de segunda ordem, verificou-se que a viga é capaz de suportar um carregamento 29% maior com um nível de

segurança maior que a confiabilidade alvo.

Comparando os índices de confiabilidade obtidos no presente trabalho com os índices obtidos por outros autores, observa-se na Tabela 4 que os índices de confiabilidade obtidos por Zhang *et al.* (2018) são próximos daqueles obtidos no presente trabalho, levando à probabilidades de falha da mesma ordem de grandeza.

Observa-se ainda na Tabela 4 que os índices de confiabilidade obtidos pelos outros autores são um pouco menores do que os índices obtidos no presente trabalho, levando a probabilidades de falha ligeiramente maiores. Essa pequena diferença entre os resultados pode ser justificada pois Zhang *et al.* (2018) empregaram o método de simulação direta de Monte Carlo na avaliação da probabilidade de falha, empregaram na análise inelástica o método da zona plástica (discretização da seção transversal em fibras) com tensões residuais e consideraram o encruamento do aço no diagrama tensão-deformação.

## 6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foram realizadas análises de confiabilidade de duas estruturas planas de aço via análise estrutural avançada em elementos finitos, considerando os efeitos da não linearidade geométrica e da inelasticidade do aço. O método analítico FORM foi empregado na avaliação da probabilidade de falha do sistema com relação ao estado limite último do colapso plástico.

No primeiro exemplo foi analisado o pórtico de Vogel (1985), onde foi possível conhecer o nível de confiabilidade obtido ao se utilizar as prescrições da norma NBR 8800 (ABNT, 2008) na verificação do colapso plástico do pórtico, ou seja, foi possível conhecer o real nível de segurança do sistema estrutural quando projetado pela norma brasileira.

No segundo exemplo foi analisada uma viga contínua de três vãos, onde foi possível conhecer o nível de confiabilidade obtido ao se utilizar as prescrições da norma americana ANSI 360 (AISC, 2010). A viga analisada tem capacidade significativa para redistribuição de carga inelástica, e através da análise de confiabilidade foi possível conhecer o nível de segurança para os carregamentos que levam à formação da primeira rótula plástica e ao colapso plástico. Observou-se que através da análise avançada é possível aproveitar melhor a resistência do aço, mantendo-se uma confiabilidade maior que a confiabilidade alvo .

## REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 8800: **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Rio de Janeiro, 2008.

AISC. **ANSI 360 - Specification for structural steel buildings**. American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois, USA, 2010.

Ang, A. H. S. & Tang, W. H. **Probability concepts in engineering planning and design – decision, risk and reliability**. John Wiley & Sons, v. II, 562 p., 1984.

Bartlett, F. M. *et al.* Updating standard shape material properties database for design and reliability. **Eng. J. AISC**, 40(1), 2–14, 2003.

Cornell, C. A. A Probability-Based Structural Code. **Journal of the American Concrete Institute**, Vol. 66, n. 12, p. 974-985, 1969.

Ellingwood, B. *et al.* Probability based load criteria: load factor and load combinations. **Journal of the Structural Division**. ASCE, vol. 108, n. 5, p. 978-997, 1982.

Ellingwood, B. R. LRFD: Implementing structural reliability in professional practice. **Eng. Struct.**, 22(2), 106–115, 2000.

Gonçalves, G. A. **Modelagem do comportamento inelástico de estruturas de aço: membros sob flexão em torno do eixo de menor inércia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

Hasofer, A. M. & Lind, N. C. An exact and invariant first-order reliability format. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 100, p. 111-121, 1974.

Hendawi, S. & Frangopol, D. M. System reliability and redundancy in structural design and evaluation. **Structural Safety**, 16(1–2), 47–71, 1994.

Lavall, A. C. C. *et al.* Análise avançada de pórticos de aço conforme as prescrições da ABNT NBR 8800: 2008. **Revista da Estrutura de Aço**, vol. 2, n. 3 (dezembro/2013), 2013.

Liew, J.Y.R. *et al.* Second-order refined plastic hinge analysis for frame design. **Journal of Structural Division**, vol. 119(11), 1993.

Madsen, H. O. *et al.* **Methods of structural safety**. Dover Publications, 2. ed., 416 p, 2006.

Mapa, D. L. S. *et al.* **Confiabilidade Estrutural de Pórticos de Aço**. **Revista da Estrutura de Aço**, vol. 8, n. 1 (abril/2019), 2019.

Mapa, D. L. S. **Confiabilidade estrutural de pórticos metálicos planos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

Melchers, R. E. **Structural reliability analysis and prediction**. John Wiley & Sons, 2. ed., 431 p, 1999.

Rackwitz, R. & Fiessler, B. Structural reliability under combined random load sequences. **Computer and Structures**, v. 9, p. 489-494, 1978.

Sagrilo, L. V. S. **Confiabilidade estrutural – métodos analíticos para análise de confiabilidade**. Notas de aula – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

Silva, A. R. D. **Sistema computacional para análise avançada estática e dinâmica de estruturas metálicas**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

Vogel, U. Calibrating Frames. **Stahlbau**, vol. 54 (outubro/1985), p. 295-301, 1985.

Zhang, H. *et al.* System Reliabilities of Planar Gravity Steel Frames Designed by the Inelastic Method in AISC 360-10. **J. Struct. Eng.**, 144(3): 04018011, 2018.

## AVALIAÇÃO DA VAZÃO DE ASPERSORES SUBMETIDOS A DIFERENTES PRESSÕES

### **Anderson Crestani Pereira**

Mestrando em Engenharia Agrícola  
Universidade Federal de Santa Maria-UFSM  
Departamento de Engenharia Rural  
Santa Maria-RS

### **Adroaldo Dias Robaina**

Docente na Universidade Federal de Santa Maria-  
UFSM  
Departamento de Engenharia Rural  
Santa Maria-RS

### **Marcia Xavier Peiter**

Docente na Universidade Federal de Santa Maria-  
UFSM  
Departamento de Engenharia Rural  
Santa Maria-RS

### **Bruna Dalcin Pimenta**

Doutoranda em Engenharia Agrícola  
Universidade Federal de Santa Maria-UFSM  
Departamento de Engenharia Rural  
Santa Maria-RS

### **Jardel Henrique Kirchner**

Doutorando em Engenharia Agrícola  
Universidade Federal de Santa Maria-UFSM  
Departamento de Engenharia Rural  
Santa Maria-RS

### **Wellington Mezzomo**

Doutorando em Engenharia Agrícola  
Universidade Federal de Santa Maria-UFSM  
Departamento de Engenharia Rural  
Santa Maria-RS

### **Marcos Vinicius Loregian**

Mestrando em Agronomia  
Universidade Federal de Santa Maria-UFSM  
Departamento de Fitotecnia  
Santa Maria-RS

### **Jhosefe Bruning**

Doutorando em Engenharia Agrícola  
Universidade Federal de Santa Maria-UFSM  
Departamento de Engenharia Rural  
Santa Maria-RS

### **Luis Humberto Bahú Ben**

Doutor em Engenharia Agrícola  
Universidade Federal de Santa Maria-UFSM  
Santa Maria-RS

**RESUMO:** O sucesso da irrigação depende de uma série de fatores, entre eles, a uniformidade da lâmina de água aplicada. Devido a isso, este trabalho objetivou avaliar experimentalmente a vazão de aspersores submetidos a diferentes pressões de serviço e comparar com os valores de vazão fornecidos pelo fabricante. O experimento foi realizado no Laboratório de Hidráulica Agrícola da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Nos testes, foram utilizados os aspersores comerciais do modelo P5 da marca Agrojet. A avaliação da vazão foi realizada através de um hidrômetro juntamente com um cronômetro para estimar a vazão

obtida para cada pressão de serviço. Foram testadas 5 pressões de serviço (10, 15, 20, 25 e 30 mca) e 5 aspersores para cada variação de pressão, havendo repetição em todo experimento. Os resultados de vazão encontrados, para as 5 pressões de serviço, respectivamente, foram de 260,96 l/h, 300,66 l/h, 344,64 l/h, 384,64 l/h e 429,20 l/h. Para análise estatística dos dados utilizou-se o índice de desempenho, o qual forneceu classificação “excelente” entre os valores de vazão observados com os valores fornecidos pelo catálogo do fabricante, demonstrando que os aspersores podem ser utilizados sem que haja desuniformidade na lâmina de água aplicada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sistemas de irrigação, uniformidade de aplicação, índice de desempenho.

## EVALUATION OF THE FLOW OF SPRINKLERS SUBMITTED TO DIFFERENT PRESSURES

**ABSTRACT:** The success of irrigation depends on a number of factors, including the uniformity of the applied water depth. Due to this, this work aimed to evaluate experimentally the flow rate of sprinklers submitted to different pressures and to compare with the flow rates provided by the manufacturer. The experiment was carried out at the Agricultural Hydraulics Laboratory of the Federal University of Santa Maria (UFSM). In the tests, commercial sprinklers of the P5 model of the Agrojet brand were used. The evaluation of the flow was performed through a hydrometer along with a timer to estimate the flow rate obtained for each service pressure. Five service pressures (10, 15, 20, 25 and 30 mca) and 5 sprinklers were tested for each pressure variation, with repetition in every experiment. The results for the 5 service pressures, respectively, were 260.96 l/h, 300.66 l/h, 344.64 l/h, 384.64 l/h and 429.20 l/h. For the statistical analysis of the data, the performance index was used, which provided an “excellent” classification between the flow values observed with the values provided by the manufacturer’s catalog, showing that the sprinklers can be used without any unevenness of the water slide applied.

**KEYWORDS:** Irrigation systems, application uniformity, performance index.

## INTRODUÇÃO

A agricultura irrigada tem sido uma importante estratégia para otimização da produção de alimentos, promovendo desenvolvimento sustentável no campo, com geração de emprego e renda (LUNA et al., 2013). Porém, a disponibilidade de água tem se tornado cada vez mais limitante, devendo ser utilizada de maneira criteriosa e precisa, não só visando a otimização da produtividade e da qualidade final do produto, mas também o uso adequado dos recursos hídricos (BERNARDO et al., 2006).

A avaliação do desempenho de um sistema de irrigação é etapa fundamental antes que qualquer estratégia de manejo de irrigação seja implementada, pois é com base nesses resultados que será possível avaliar e adequar o equipamento e sua

utilização, em relação aos requerimentos de água dos cultivos utilizados.

A melhoria na uniformidade de um sistema de irrigação é uma das decisões mais importantes para o manejo adequado da água aplicada, pois a água em excesso, além de causar danos, pode carrear nutrientes para zonas do solo não exploráveis pelas raízes (BERNARDO et al., 2006).

Para que a irrigação seja eficiente, é fundamental que os sistemas apresentem uniformidade de aplicação da água, igual ou acima dos limites estabelecidos, nos quais são considerados fundamentais para tomada de decisão em relação ao diagnóstico dos sistemas (PAULINO et al., 2009). Uma vez instalado um projeto de irrigação, é necessário verificar se as condições inicialmente previstas se confirmam em campo. Para isso, deve-se avaliar as condições de pressão, vazão e lâminas d'água aplicada pelos aspersores.

Em algumas propriedades agrícolas, os produtores não realizam revisões nos sistemas de irrigação, os quais, geralmente, são utilizados durante anos sem nenhuma ou com reduzida revisão de seus componentes.

Na literatura há trabalhos que avaliaram sistemas de irrigação por aspersão e demonstraram que os principais defeitos nesses equipamentos ocorrem em vazamentos ao longo das tubulações, entupimento de aspersores e falta de manutenção no conjunto motobomba.

Devido a isso, é de suma importância verificar se as informações fornecidas pelos fabricantes de aspersores conferem com as vazões à campo. Para isso, esse trabalho tem como objetivo comparar as vazões de aspersores submetidos à diferentes pressões de serviço com os valores fornecidos através do catálogo do fabricante dos mesmos.

## REFERENCIAL TEÓRICO

A falta de revisão e de manutenção do sistema é uma das principais causas da má distribuição de água no solo, resultando em perdas na produtividade potencial quando comparado com áreas cultiváveis que utilizem manejo adequado da irrigação, com todo o sistema operacional funcionando de maneira eficaz.

A avaliação do desempenho de um sistema de irrigação é etapa fundamental a ser realizada, pois é com base nesses resultados que será possível avaliar e adequar o sistema em relação à necessidade de água que a cultura exige. No entanto, a avaliação do desempenho de sistemas de irrigação em áreas cultivadas é uma prática que, muitas vezes, não é realizada por parte de técnicos e de produtores rurais.

Uma das maneiras para uniformizar os sistemas de irrigação é a correta escolha dos aspersores, adequando a necessidade de água que a cultura exige com as características operacionais dos mesmos.

Há casos em que os produtores irrigantes se guiam apenas pelo catálogo fornecido pelo fabricante do aspersor para determinar a vazão, o que pode ocasionar

uma aplicação de lâmina de água excessiva ou deficitária em comparação com a lâmina de reposição necessária para a cultura agrícola irrigada. Desta forma, é de grande importância a realização de ensaio de uniformidade de aplicação de água, pois só por meio deste é possível verificar a fração de água aplicada em determinada área, sabendo assim, onde está em excesso e déficit hídrico (PINTO et al., 2015).

A vazão do aspersor é função do diâmetro do bocal e da pressão de serviço. Quando a pressão é excessiva, ocorre a diminuição do tamanho médio de gotas em função da fragmentação do jato de água, diminuindo, também, o raio de alcance da lâmina d'água devido a deriva das gotas.

Outro fator que pode interferir na vazão do aspersor é a variação no processo de fabricação dos mesmos, podendo acarretar diferenças na vazão obtida a campo em relação a fornecida pelo fabricante.

## MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Laboratório de Hidráulica Agrícola do Departamento de Engenharia Rural da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Foi testada a variação da vazão de aspersores submetidos a diferentes pressões de serviço baseada na norma técnica (NBR ISO 3951) fornecida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), na qual, padroniza os procedimentos que devem ser realizados em avaliações da vazão de aspersores.

Os aspersores comerciais utilizados foram do modelo P5 da marca Agrojet (Figura 1).



Figura 1 - Aspersor P5, Agrojet.

A determinação da vazão foi realizada através de um hidrômetro com volume conhecido, e, através de um cronômetro, foi medido o tempo para uma volta completa do mesmo. A pressão de serviço foi monitorada por um manômetro instalado no tubo de elevação próximo ao aspersor testado. Utilizou-se a expressão  $Q = V/T$  para obtenção da vazão medida, em que Q é a vazão (l/h), V é o volume (litros) e T é o tempo (horas).

Os testes foram realizados com 5 pressões de serviço (10, 15, 20, 25 e 30 mca), de acordo com o catálogo fornecido pelo fabricante do aspersor. Foram utilizados 5 aspersores para cada variação da pressão, repetindo o processo várias vezes a fim de

aumentar a confiabilidade dos dados.

Pode-se observar, na Figura 2, o aspersor sendo testado em laboratório. Utilizou-se uma caixa de acrílico para conter a água no momento da realização dos testes.



Figura 2 - Teste em laboratório de um dos aspersores.

Para a avaliação da variação de fabricação dos aspersores adotou-se a metodologia proposta por Solomon (1979), que utiliza a relação entre o desvio padrão da vazão do aspersor e a sua vazão média submetida a testes com pressão.

Para comparar as vazões fornecidas pelo fabricante (teórica) e as medidas experimentalmente (observadas) utilizou-se o Índice de Concordância ( $I_c$ ), proposto por Willmott (1981), no qual mede o grau de exatidão entre as variáveis envolvidas, em que seus valores variam de zero a um e podem ser calculados pela Equação 1:

$$I_c = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - O| + |O_i - O|)^2} \right]$$

(1)

Em que:  $E_i$  é o valor da observação estimada,  $O_i$  é o valor da observação medida e  $O$  é a média da observação medida.

De acordo com Schneider, Schneider e Souza (2009), o grau de associação entre as duas variáveis envolvidas na análise pode ser estimado pelo Coeficiente de Correlação ( $r$ ) (Equação 2), no qual quanto maior o seu valor absoluto maior a associação entre as variáveis.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - E)(O_i - O)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - E)^2 \sum_{i=1}^n (O_i - O)^2}}$$

(2)

Em que:  $E_i$  são os valores estimados,  $O_i$  os valores observados,  $E$  a média dos valores estimados e  $O$  a média dos valores observados.

Para a avaliação do desempenho das vazões foi utilizado o Índice de Desempenho (Id) (Equação 3), proposto por Camargo e Sentelhas (1997), cujo valor é o produto do Índice de Concordância e o Coeficiente de Correlação.

$$Id = Ic \cdot r \quad (3)$$

De acordo com Pimenta et al. (2018), o critério para interpretação do Índice de Concordância, do Coeficiente de Correlação e do Índice de Desempenho e suas respectivas classificações estão apresentados na Tabela 1.

Índice de Concordância (d)	Coeficiente de Correlação (r)	Índice de Desempenho (Id)	Classificação
0,95 – 1,00	0,95 – 1,00	0,90 – 1,00	Excelente
0,89 – 0,95	0,89 – 0,95	0,80 – 0,90	Ótimo
0,84 – 0,89	0,84 – 0,89	0,70 – 0,80	Muito Bom
0,77 – 0,84	0,77 – 0,84	0,60 – 0,70	Bom
0,71 – 0,77	0,71 – 0,77	0,50 – 0,60	Moderadamente Bom
0,63 – 0,71	0,63 – 0,71	0,40 – 0,50	Moderado
0,55 – 0,63	0,55 – 0,63	0,30 – 0,40	Moderadamente Ruim
0,45 – 0,55	0,45 – 0,55	0,20 – 0,30	Ruim
0,32 – 0,45	0,32 – 0,45	0,10 – 0,20	Muito Ruim
0,00 – 0,32	0,00 – 0,32	0,00 – 0,10	Péssimo

Tabela 1. Critério para interpretação do Índice de Concordância, do Coeficiente de Correlação e do Índice de Desempenho e suas respectivas classificações.

Fonte: Pimenta et al. (2018).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os valores de vazão teórica e observada do aspersor quando submetido a diferentes pressões de serviço.

Pressão (mca)	Vazão (l/h)		
	Teórica	Observada	Desvio padrão
10	250	261	5,5
15	293	301	3,8
20	341	345	1,8
25	389	385	2,2
30	431	429	0,9

Tabela 2. Valores médios da vazão teórica e da observada submetidas a diferentes pressões de serviço.

Segundo a Tabela 2, podemos observar que ocorrem pequenos desvios entre a

vazão teórica e a vazão observada. As maiores diferenças acontecem nas menores pressões testadas devido ao fato que as mesmas são mais difíceis de estabilizar, ocasionando, dessa forma, uma maior oscilação na vazão.

A normativa técnica proposta pela ABNT sugere que para aspersores que possuam vazões nominais acima de 250 l/h a variação da vazão não seja superior a 5 % de erro relativo. Obteve-se como resultados do teste uma variação da vazão de 4,4 %, 2,7 %, 1,17 %, 1,03 % e 0,69 % para as pressões de serviço de 10, 15, 20, 25 e 30 mca, respectivamente.

Com base na classificação da norma e nos resultados obtidos observa-se que todas as vazões nas distintas pressões de serviço estão em conformidade com a normativa da ABNT.

Na Figura 3 estão representados os valores de vazão teórica (l/s) e de vazão observada (l/s) do aspersor em sua variação de pressão de serviço.

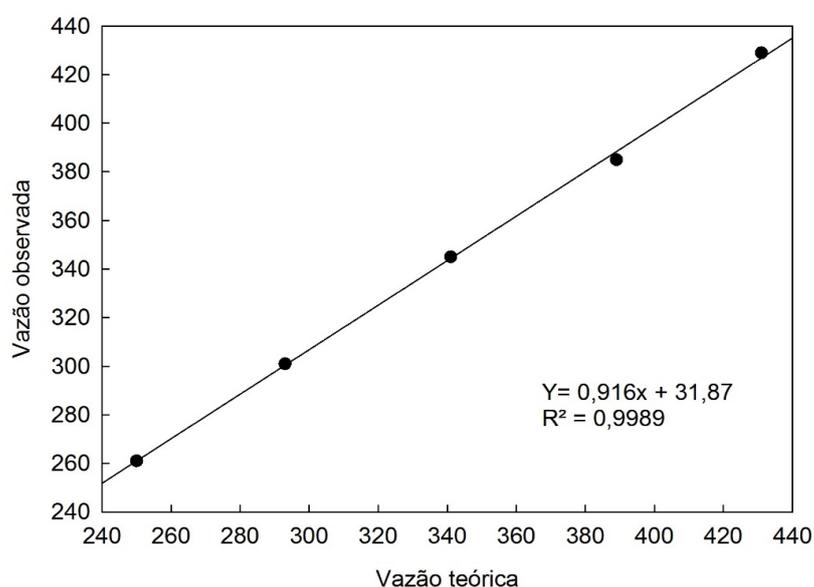


Figura 3 - Vazões teóricas e observadas dos aspersores.

Nota-se, na Figura 3, que os valores das vazões apresentam forte aderência à reta de regressão, evidenciado pelo elevado coeficiente de determinação, demonstrando que os procedimentos metodológicos e experimentais utilizados foram adequados.

Vazão teórica vs vazão observada		Classificação
Ic	0,9977	Excelente
r	0,9984	
Id	0,9992	

Tabela 3. Valores obtidos através do Índice de Concordância (Ic), Coeficiente de Correlação (r) e Índice de Desempenho (Id) com sua respectiva classificação.

Observa-se, pela Tabela 3, que os valores das vazões apresentaram Id classificado como “excelente”, demonstrando que os valores avaliados experimentalmente se

adequam aos fornecidos pelo fabricante do aspersor.

Em relação a variação na fabricação dos aspersores, obteve-se um resultado médio de 1%, o que, segundo a metodologia utilizada, se classifica como excelente, evidenciando que o processo de fabricação dos aspersores é semelhante, não modificando, assim, os valores de vazão entre eles.

## CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos pode-se inferir que os aspersores ensaiados apresentaram valores de vazão de acordo com o catálogo fornecido pelo fabricante, estando de acordo com as normativas técnicas da ABNT. Além disso, há pequena variação no processo de fabricação entre os aspersores utilizados.

## REFERÊNCIAS

ABNT. NBR/ISO 7749-1. **Equipamentos de irrigação agrícola - Aspersores rotativos - Parte 1: Requisitos para projetos e operação**. Rio de Janeiro, Brasil, 2000. 12 p.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 8.ed. Viçosa: UFV, 2006. 625 p.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. **Avaliação de desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo**. Revista Brasileira de Agrometeorologia, v. 5, n. 1, p.89-97, 1997.

LUNA, N. R. S.; ANDRADE, E. M.; CRISÓSTOMO, L. A.; MEIRELES, A. C. M.; AQUINO, D. N. **Dinâmica do nitrato e cloreto no solo e a qualidade das águas subterrâneas do distrito de irrigação Baixo Acaraú, CE**. Revista Agro@ambiente Online, v. 7, n.1, p.53-62, 2013.

PAULINO, M. A. O.; de FIGUEIREDO, F. P.; FERNANDES, R. C.; MAIA, J. T. L. S.; de OLIVEIRA GUILHERME, D.; BARBOSA, F. S. **Avaliação da uniformidade e eficiência de aplicação de água em sistemas de irrigação por aspersão convencional**. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, v. 3, n. 2, 2013.

PIMENTA, B. D.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X., MEZZOMO, W.; KIRCHNER, J. H.; BEN, L. H. B. **Performance of explicit approximations of the coefficient of headloss for pressurized conduits**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 22, n. 5, p. 301-307, 2018.

PINTO, U. R. C.; RIBEIRO, P. H. P.; SALOMÃO, L. C.; DE CANTUÁRIO, F. S.; DE BRITO, R. R.; DE SOUSA SILVA, T. T.; CONEGLIAN, A. **Uniformidade de distribuição de água em aspersão convencional sob diferentes pressões de serviços**. Global Science and Technology, v. 8, n. 2, 2015.

SCHNEIDER, P. R.; SCHNEIDER, P. S. P.; SOUZA, C. A. M. **Análise de regressão aplicada à Engenharia Florestal**. 2. ed. Santa Maria: UFSM, 2009. 294 p.

SOLOMON, K. **Manufacturing variation of trickle emitters**. Transaction of the ASAE, St. Joseph, v. 22, n. 5, p.1038- 8. 1979.

WILLMOTT, C. J. **On the validation of models**. Physical Geography, v.2, p. 184-194. 1981.

## AVALIAÇÃO DO BINÔMIO TEMPO-TEMPERATURA DE REFEIÇÕES SERVIDAS EM RESTAURANTES SELF-SERVICE DE PICOS-PI

### **Nara Vanessa dos Anjos Barros**

Professor Assistente do curso de Bacharelado em Nutrição, Universidade Federal do Piauí/Campus Senador Helvídio Nunes de Barros – Picos – PI.

### **Mateus da Conceição Araújo**

Universidade Federal do Piauí/Campus Senador Helvídio Nunes de Barros – Picos – PI.

### **Adolfo Pinheiro de Oliveira**

Universidade Federal do Piauí/Campus Senador Helvídio Nunes de Barros – Picos – PI.

### **Iraildo Francisco Soares**

Universidade Federal do Piauí/Campus Senador Helvídio Nunes de Barros – Picos – PI.

### **Ennya Cristina Pereira dos Santos Duarte**

Universidade Federal do Piauí/Campus Senador Helvídio Nunes de Barros – Picos – PI.

### **Rodrigo Barbosa Monteiro Cavalcante**

Faculdade de Nutrição (FANUT), Universidade Federal de Goiás (UFG) – Goiânia - Goiás.

**RESUMO:** objetivou-se analisar o binômio tempo-temperatura em restaurantes do tipo *self-service*, sendo avaliados 10 estabelecimentos na cidade de Picos-PI. O período de exposição dos alimentos foi em torno de três horas e meia e aferiu-se temperatura com termômetro digital infravermelho, direcionando-o ao centro da cuba. Analisaram-se as temperaturas de 111 refeições e/ou preparações alimentícias quentes e frias dos restaurantes. Após a

coleta dos dados, as preparações quentes que estavam inadequadas: carnes e preparações cárneas (96,7%); legumes refogados e tubérculos, farofas, massas, feijão, arroz e preparações associadas estavam com 100% de inadequação. Para as preparações frias, observaram-se percentuais de inadequação para frutas, saladas cruas e cozidas (100%) e sobremesas frias (95,2%). Concluiu-se que os restaurantes avaliados não estão adequados em relação à legislação, o que pode agravar o risco de contaminação e o surgimento das doenças transmitidas por alimentos.

**PALAVRAS-CHAVE:** segurança alimentar, restaurante, temperatura.

**ABSTRACT:** this study aimed to analyze the time-temperature binomial in restaurants of *self-service* type, and evaluated 10 establishments in the city of Picos-PI. The period of exposure of the food was around three and a half hours and the temperature was calibrated with an infrared digital thermometer, directing it to the center of the tub. Temperatures of 111 meals and / or hot and cold food preparations of the restaurants were analyzed. After data collection, hot preparations that were inadequate: meats and meat preparations (96.7%); Sautéed vegetables and tubers, farofas, pasta, beans, rice and associated preparations were 100% inadequate. For cold preparations, percentages

of inadequacy for fruits, raw and cooked salads (100%) and cold desserts (95.2%) were observed. It was concluded that the evaluated restaurants are not adequate in relation to the legislation, which can aggravate the risk of contamination and the emergence of foodborne diseases.

**KEYWORDS:** food safety, restaurant, temperature.

## 1 | INTRODUÇÃO

Em território brasileiro, calcula-se que, de cada cinco refeições, uma é feita fora do âmbito familiar, na Europa duas em cada seis e, nos EUA, uma em cada duas. Esse cálculo indica que ainda pode haver um grande aumento e desenvolvimento dos estabelecimentos que produzem e fornecem alimentos para o consumo imediato no país (ARAÚJO e CARDOSO, 2002). Tais estabelecimentos compreendem unidades de produção de porte e tipos de sistematização diferentes entre si, como restaurantes de hotéis, *coffee shops*, *buffets*, restaurantes comerciais, cozinhas industriais, lanchonetes, *fast food*, *catering* e cozinhas hospitalares (PAYNE-PALACIO, 1994).

Entre os estabelecimentos do segmento comercial, os restaurantes por peso ou *self-service* por quilo, são um dos mais procurados pela população brasileira. Estes ocupam em segundo lugar no *ranking* de estabelecimentos com maior ocorrência de doenças transmitidas por alimentos (DTA). Um dos fatores que limitam a qualidade higiênico-sanitária dos alimentos que podem estar presentes nas refeições servidas nesses restaurantes corresponde a sua contaminação por microrganismos durante o processamento e a ocorrência de DTA (PROENÇA et. al., 2005).

Para tal, o binômio tempo-temperatura é um fator muito importante na distribuição de refeições. Muitos dos alimentos comercializados são mantidos em balcões de distribuição, que tem como finalidade garantir a segurança do ponto de vista microbiológico por meio das condições de tempo e temperatura (SANTOS; RANGEL; AZEREDO, 2010). No entanto, com a exposição destas preparações por longos períodos e, na maior parte das vezes sob temperatura inadequada, o desenvolvimento de microrganismos potencialmente perigosos à saúde do consumidor tende a acontecer e colocam em questão a qualidade microbiológica da refeição servida (BANDEIRA et al., 2008; MARINHO; SOUZA; RAMOS, 2009; ROCHA et al., 2010).

Nesse contexto, o objetivo do estudo foi analisar o binômio tempo-temperatura em restaurantes do tipo *self-service* na cidade de Picos, estado do Piauí.

## 2 | METODOLOGIA

Tratou-se de um estudo transversal, observacional e descritivo, realizado em restaurantes do tipo *self-service* localizados no município de Picos-PI, no ano de 2016. Foram visitados 14 restaurantes *self-service*. Dentre esses, 10 restaurantes autorizaram a coleta de dados.

Os restaurantes foram visitados no horário do almoço, que ocorria das 11 às 14:30 h, sem aviso prévio, para aferição das temperaturas das preparações. Assim, foram aferidas as temperaturas em três momentos: no início (no momento da abertura do restaurante), no meio (duas horas e 15 minutos após o início da distribuição) e ao final da distribuição (no encerramento da distribuição e recolhimento das cubas).

As preparações analisadas incluíam arroz e preparações associadas, feijão, carnes e preparações cárneas, massas, farofas e, legumes refogados e tubérculos. Estas preparações foram escolhidas por serem comuns aos cardápios dos restaurantes visitados, para fins de padronização e viabilização da comparação dos resultados.

Utilizou-se termômetro digital infravermelho *Infrared Thermometer* com faixa de variação entre  $-50^{\circ}\text{C}$  a  $+420^{\circ}\text{C}$ , direcionando-o ao centro da cuba, fixado a uma distância de 2 cm por aproximadamente 5 segundos ou até estabilização da temperatura. Todos os estabelecimentos avaliados possuíam balcões térmicos quentes, no entanto, nem todos possuíam balcão refrigerado para distribuição dos alimentos.

Os dados coletados foram anotados em planilha elaborada pelos pesquisadores, onde constavam o local, horário de distribuição, as temperaturas nos diferentes períodos e a preparação analisada. Após a mensuração, realizou-se a análise descritiva dos dados com cálculo de média aritmética, e estes foram expostos por meio de tabelas e gráficos, utilizando-se planilhas no programa Microsoft Excel®.

Os resultados foram analisados segundo as temperaturas preconizadas pela Resolução RDC nº 216 de 15 de setembro de 2004 e CVS 5/2013, que regulamentam a distribuição de alimentos quentes a temperatura  $\geq 60^{\circ}\text{C}$  por, no máximo, seis horas e de preparações frias até  $10^{\circ}\text{C}$  por, no máximo, quatro horas (ANVISA, 2004; CVS, 2013).

Após a análise dos resultados, foram disponibilizados aos gerentes dos restaurantes relatórios com os resultados e sugestões de ações a serem desenvolvidas para melhoria da qualidade dos serviços.

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisaram-se as temperaturas de 90 refeições e/ou preparações alimentícias de restaurantes *self-service*, as quais foram agrupadas em: arroz e preparações associadas, feijão, carnes e preparações cárneas, massas, farofas e, legumes refogados e tubérculos (Tabela 1).

Preparações quentes (n=90)	T °C (Início)	T °C (Intermediária)	T °C(Fim)	T °C (Média)
Arroz e preparações associadas	46,21	45,76	44,28	45,42
Feijão	52,3	48,75	48,45	49,83
Carnes e preparações cárneas	47,95	48,82	49,40	48,72
Massas	45,27	42,93	40,78	42,99
Farofas	33,4	41,27	35,07	36,58

Legumes refogados e tubérculos	37,41	32,34	31,93	33,90
--------------------------------	-------	-------	-------	-------

Tabela 1 – Temperaturas médias das refeições quentes de acordo com o período de distribuição em restaurantes tipo *self-service*.

As temperaturas médias das preparações quentes avaliadas variaram entre 33,9°C e 49,83°C, demonstrando a inadequação segundo a legislação vigente. A menor temperatura avaliada foi a de legumes refogados e tubérculos (33,9°C). Sendo que a porcentagem de inadequação das refeições quentes, apresentaram-se com 100% de inadequação em todas as preparações, exceto, as preparações cárneas que apresentaram percentual um pouco abaixo (96,7%).

Foi possível observar, durante a coleta dos dados, no período de pós-cozção até o início e o final da distribuição, que algumas das preparações permaneceram sob temperaturas abaixo do recomendado pela legislação e outras expostas à temperatura ambiente. Ao observar a média das temperaturas de distribuição, notou-se uma redução de temperatura, que ocorreu devido à ausência de um sistema de manutenção de calor do alimento.

Após a coleta dos dados, observou-se um percentual elevado de inadequações para preparações cárneas (96,7%), e para os legumes refogados e tubérculos, farofas, massas, feijão, arroz e preparações associadas apresentaram-se com 100% de inadequação.

Entre as temperaturas analisadas das 21 refeições e/ou preparações alimentícias frias, que incluíram as saladas cruas, saladas cozidas, sobremesas frias e frutas, observaram-se percentuais de inadequação elevados, conforme a Tabela 2.

Preparações frias (n=21)	T °C (Início)	T °C (Intermediário)	T °C (Fim)	T °C (Média)
Saladas cruas	24,44	19,98	21,03	21,82
Saladas cozidas	25,23	19,05	19,70	21,33
Sobremesas frias	10,72	13,42	14,12	12,75
Frutas	25,75	16,05	17	19,60

Tabela 2 – Temperaturas médias das refeições frias de acordo com o período de distribuição das refeições em restaurantes tipo *self-service*.

As temperaturas médias das preparações frias avaliadas variaram entre 12,75°C e 21,82°C, mostrando a inadequação perante à legislação. A menor temperatura avaliada foi a da preparação de sobremesas frias (12,75°C), seguida das frutas (19,6°C), das saladas cozidas (21,33°C) e das saladas cruas (21,82°C). A porcentagem de inadequação das refeições frias, onde todas as preparações apresentaram-se com 100% de inadequação, exceto, as preparações de sobremesas frias que apresentaram percentual um pouco abaixo (95,2%).

Observou-se que no período da distribuição, algumas preparações estavam sob

temperaturas acima do recomendado e outras permaneceram expostas à temperatura ambiente, isto devido que alguns dos estabelecimentos *self-service* visitados não apresentavam balcão de refrigeração. Vale ressaltar que a única amostra que atingiu temperaturas  $\leq 10^{\circ}\text{C}$  durante o período de distribuição foi a de sobremesas frias, o que tornou esta preparação com um menor percentual de inadequação em relação às outras.

Com relação a inadequação das preparações frias, em percentual, frutas, saladas cruas e cozida apresentaram-se com 100% e sobremesas frias com um percentual de inadequação de 95,2%.

Ao observar os resultados deste estudo, as temperaturas médias de todas as preparações analisadas nos restaurantes *self service* no município de Picos-PI estavam inadequados, pois se encontravam inferiores a  $60^{\circ}\text{C}$ . Preparações com temperaturas fora da faixa recomendada colocam em risco as refeições servidas, uma vez que viabilizam a multiplicação de microrganismos e assim podem promover o desenvolvimento de DTAs. Resultados semelhantes foram observados por Ventimiglia e Basso (2008), ao avaliarem as temperaturas das refeições de um restaurante de alimentação coletiva situado na cidade de Santa Maria (RS), apresentaram temperaturas das carnes inferiores a  $60^{\circ}\text{C}$ . Foram evidenciados por Amorim e Pinheiro (2012) as temperaturas médias superiores às do presente estudo para as preparações arroz ( $69,68^{\circ}\text{C}$ ), carne ( $63,12^{\circ}\text{C}$ ), massa ( $58,32^{\circ}\text{C}$ ) e feijão ( $63,27^{\circ}\text{C}$ ), em um restaurante comercial em Belo Horizonte. Do mesmo modo, temperaturas de carnes de  $63,1^{\circ}\text{C}$  foram verificadas por Barbieri, Esteves e Matoso (2011).

No estudo realizado por Faé e Freitas (2009), evidenciaram que o grupo do feijão foi o único que se mostrou 100% de temperaturas adequadas, mesmo ainda em alguns momentos apresentando temperaturas abaixo a  $60^{\circ}\text{C}$ , jamais excedeu 3 horas de exposição a essa temperatura. Isso se deve ao fato dessa leguminosa ser cozida com água em ponto de ebulição no momento de preparo, aumentando assim suas temperaturas. No entanto, no presente estudo, o grupo do feijão apresentou com 100% de inadequação de acordo com as temperaturas médias descritas na Tabela 1.

Em relação às preparações refrigeradas, observaram-se elevados índices de inadequação variando de 95,2% e 100%. De acordo com as médias das temperaturas, nenhuma das preparações atingiu a temperatura recomendada de  $<10^{\circ}\text{C}$ . Resultados semelhantes foram também encontrados por Rocha et. al. (2010) em um estudo realizado na cidade de Patos de Minas (MG), ao avaliarem 17 restaurantes do tipo *self service* a temperatura de saladas. Por Calado, Ribeiro e Frota (2009), ao aferirem a temperatura em 21 estabelecimentos na cidade de São Luís (MA), de 27 preparações frias.

Com relação à temperatura da salada cozida, ela não se encontrava adequada, porque preparações frias devem ser acondicionados em até  $10^{\circ}\text{C}$  (ANVISA, 2004). Quando a temperatura se apresentar entre  $10^{\circ}\text{C}$  e  $21^{\circ}\text{C}$ , só pode manter na distribuição por até duas horas, preparações frias que transcender os parâmetros de tempo e

temperatura estabelecidos devem ser descartados (VENTIMIGLIA e BASSO, 2008).

## 4 | CONCLUSÃO

A partir dos dados obtidos, revelou-se um elevado percentual de inadequação das temperaturas dos alimentos distribuídos em restaurantes *self service* no município de Picos-PI. Pôde-se observar que a maioria das preparações não atingiu as temperaturas recomendadas pela legislação vigente, o que pode agravar o risco de contaminação e o surgimento das doenças transmitidas por alimentos.

Concluiu-se que há a necessidade de medidas corretivas para melhoria da qualidade de tempo e temperatura, como a aquisição de equipamentos como termômetros, câmeras refrigeradas para saladas, banho-maria ou geladeiras industriais, aquisição e manutenção preventiva de *pass through*, dentre outros, pois ajudariam a manter as temperaturas das preparações quentes e frias no balcão de distribuição, atuando de forma mais eficaz no controle de qualidade desses alimentos prontos ao consumo.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. Dispõe sobre regulamento técnico de boas práticas para serviços de alimentação. **Resolução RDC 216**, 15 de setembro de 2004. Brasília, 2004.
- AMORIM, M.M.A; PINHEIRO, A.F. Auditoria nas temperaturas das preparações quentes servidas no fogão a lenha de um restaurante comercial de Belo Horizonte, MG. II Seminário de Gestão de Pessoas nas Organizações de Saúde. Belo Horizonte. Resumos. **Anais II Seminário de Gestão de Pessoas nas Organizações de Saúde**. Escola de Enfermagem da UFMG. Belo Horizonte, UFMG, 2012.
- ARAÚJO, W.M.C; CARDOSO, L. **Qualidade dos alimentos comercializados no Distrito Federal no período de 1997-2001 [dissertação]**. Brasília: Universidade de Brasília; 2002.
- BANDEIRA, D. L. Q. et al. Monitoramento da temperatura de refeições prontas distribuídas em embalagens de alumínio em restaurantes do município de Natal/RN. **Revista da FARN**, Natal, v. 7, n. 2, p. 107-113, 2008.
- BARBIERE, R. R.; ESTEVES, A. C.; MATOSO, R. Monitoramento da temperatura de preparações quentes e frias em uma unidade de alimentação e nutrição. **Revista Higiene Alimentar**, São Paulo, v. 25, n. 194/195, p. 40-45, 2011.
- CALADO, I. L.; RIBEIRO, M. C. S.; FROTA, M. T. B. A. Avaliação da temperatura dos alimentos na etapa de distribuição em restaurantes *self service* de São Luís - MA. **Revista Higiene Alimentar**, São Paulo, v. 23, n. 174/175, p. 117-122, 2009.
- CENTRO DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Portaria CVS 5/2013**, de 09 de abril de 2013. Centro de Vigilância Sanitária, da Coordenadoria de Controle de Doenças, da Secretaria de Estado da Saúde de São Paulo, São Paulo, 09 abr. 2013. Disponível em <[http://www.cvs.saude.sp.gov.br/up/PORTARIA%20CVS-5\\_090413.pdf](http://www.cvs.saude.sp.gov.br/up/PORTARIA%20CVS-5_090413.pdf)> Acesso em: 09 de dez de 2016.
- FAÉ, T. S. M.; FREITAS, A. R. **Avaliação do Binômio Tempo X Temperatura na Distribuição de Alimentos, em uma Unidade de Alimentação e Nutrição em Guarapuava-PR**. Trabalho de conclusão de curso de Nutrição - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, 2009.

MARINHO, C. B.; SOUZA, C. S.; RAMOS, S.A. Avaliação do binômio tempo-temperatura de refeições transportadas. **E-scientia**, Belo Horizonte, v. 2, n. 1, 2009.

PAYNE-PALACIO J. **West's and Wood's Introduction to foodservice**. New York: MacMillan; 1994.

PROENÇA, R.P.C.; SOUSA, A.A.; VEIROS, M.B.; HERING, B. **Qualidade nutricional e sensorial na produção de refeições**. Florianópolis: Ed. da UFSC, p.221, 2005.

ROCHA, B. et al. Avaliação das condições higiênico-sanitárias e da temperatura das refeições servidas em restaurantes comerciais do tipo *self service*. **Revista do Núcleo Interdisciplinar de Pesquisa e Extensão do UNIPAM**, Patos de Minas, v. 1, n. 7, v. 1, p. 30-40, ago. 2010.

SANTOS, M.O.B.; RANGEL, V.P.; AZEREDO, D.P. Adequação de restaurantes comerciais às boas práticas. **Revista Higiene Alimentar**, São Paulo, v. 24, n 190/191, 2010.

VENTIMIGLIA, T.M.; BASSO, C. Tempo e temperatura na distribuição de preparações em uma unidade de alimentação e nutrição. **Disciplinarum Scientia**. Série: Ciência da Saúde, Santa Maria, v. 9, n.1, p. 109-114, 2008.

## AVALIAÇÃO DO EFEITO DE ANTIOXIDANTES NATURAIS NA ESTABILIDADE OXIDATIVA DO BIODIESEL

### Ingrid Rocha Teixeira

Universidade Salvador, Escola de Arquitetura,  
Engenharia e TI.  
Salvador – Bahia

### Jander Teixeira Peneluc

Universidade Salvador, Escola de Arquitetura,  
Engenharia e TI.  
Salvador - Bahia

### Matheus Andrade Almeida

Universidade Salvador, Escola de Arquitetura,  
Engenharia e TI.  
Salvador - Bahia

### Selmo Queiroz Almeida

Universidade Salvador, Escola de Arquitetura,  
Engenharia e TI.  
Salvador - Bahia

**RESUMO:** O uso do biodiesel como combustível torna-se problemático, devido à sua baixa estabilidade oxidativa. A oxidação ocorre durante sua estocagem em contato com o oxigênio ou quando submetido a altas temperaturas nas condições de operação do motor. Tais reações podem ocasionar a formação de espécies insolúveis, poliméricas, e, conseqüentemente, entupir linhas e bombas de combustíveis. Uma alternativa para inibir ou retardar essa degradação, é a adição de antioxidantes naturais. Dentre as fontes naturais, o extrato da casca da laranja, hortelã

e da película de amendoim têm se destacado por terem em suas composições uma elevada quantidade de compostos fenólicos, os quais são responsáveis pela ação antioxidante. Baseado nisso, o objetivo do presente trabalho é avaliar o efeito destes antioxidantes naturais na estabilidade oxidativa do biodiesel 80/20 % (m/m) Soja/Sebo, através da técnica de oxidação acelerada no equipamento Rancimat. Os experimentos realizados evidenciaram que todos antioxidantes utilizados elevaram a estabilidade oxidativa do biodiesel, sendo o extrato da película de amendoim o aditivo que apresentou o maior efeito, elevando em mais de 60% o tempo médio de indução do blend de estudo, para todas as concentrações testadas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Antioxidante, Biodiesel, Estabilidade oxidativa.

### 1 | INTRODUÇÃO

O constante aumento na demanda por fontes de energia e o esgotamento das reservas de petróleo de fácil extração, têm motivado a diversificação da matriz energética mundial e elevado à busca por tecnologias que permitam a utilização de energias renováveis (WILSON, 2006). Neste cenário, o biodiesel apresenta-se como um biocombustível que vem se destacando na produção mundial. Industrialmente é obtido

pela reação de transesterificação, que consiste na reação química de triglicerídeos presentes nos óleos e gordura animal, com um álcool primário na presença de um catalisador, sendo o glicerol um subproduto desta reação.

No contexto energético mundial, o biodiesel destaca-se por ser uma das fontes alternativas ao diesel fóssil. A substituição do diesel por este biocombustível é ambientalmente favorável, uma vez que, o biodiesel é praticamente livre de enxofre e compostos aromáticos, biodegradável, não tóxico, além de apresentar uma maior lubricidade, maior ponto de fulgor e menor emissão de poluentes na atmosfera (KNOTHE, GERPEN e KRAHL, 2005). No entanto, uma das principais desvantagens do biodiesel em relação ao diesel, diz respeito a sua maior suscetibilidade à degradação oxidativa, atribuída principalmente a diferenças na composição química das oleaginosas (BOUAID, MARTINEZ e ARACIL, 2007).

Um dos principais mecanismos de oxidação do biodiesel é a auto-oxidação, que ocorre quando o oxigênio atmosférico encontra os sítios reativos das moléculas dos ácidos de ésteres graxos (KARAVALAKIS et al., 2010). Esta reação radicalar ocorre, preferencialmente, nas insaturações dos ésteres, e acontece em cadeia, sendo comumente dividida em três etapas: iniciação, propagação e terminação (ARAÚJO, 2004). Este mecanismo está representado na Imagem 1.

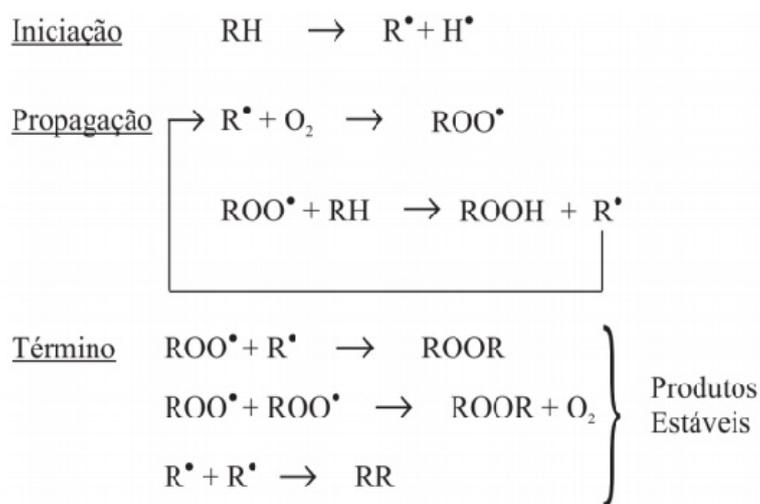


Imagem 1: Mecanismo de auto-oxidação do biodiesel.

Fonte: RAMALHO, 2006.

Na primeira etapa (iniciação) o radical livre, espécie química altamente reativa e instável, é formado através da abstração de um hidrogênio da molécula do éster de ácido graxo. O oxigênio, se presente, reage com esses radicais de forma extremamente rápida produzindo os radicais peróxidos, os quais são capazes de abstrair novos átomos de hidrogênio de outras cadeias de ésteres graxos, a fim de produzir hidroperóxidos e novos radicais livres, que podem reagir com o oxigênio, tornando esta etapa auto catalítica (fase de propagação). Por fim, a última etapa do processo, ocorre com a interação de duas espécies radicalares formando uma espécie

não radicalar (ARAÚJO, 2004).

Os produtos finais do processo oxidativo são derivados da decomposição dos hidroperóxidos, que geram aldeídos, cetonas, ácidos, ésteres, alcoóis e hidrocarbonetos de cadeias curtas. Sendo que, a presença de alcoóis acarreta diminuição do ponto de fulgor do biodiesel, tornando a mistura mais perigosa de manusear, enquanto a presença de ácidos aumenta a acidez total e o risco de corrosão (XIN; SAKA, 2010). Além disso, reações poliméricas também podem ocorrer, levando a produtos de maior massa molecular e, eventualmente, elevando a viscosidade do combustível (WAYNICK, 2005).

Em virtude do exposto, a estabilidade oxidativa apresenta-se como um parâmetro de qualidade extremamente importante para a comercialização deste biocombustível. Sendo assim, o estudo de aditivos que possam inibir ou retardar essas reações indesejáveis torna-se promissor. O uso de antioxidantes naturais como aditivo mostrou-se satisfatório quando comparado aos sintéticos, devido a não toxicidade e baixo custo. A atividade antioxidante dos aditivos, deve-se principalmente às propriedades redutoras e estrutura química dos compostos fenólicos presente em sua composição (SOUZA et al., 2007). Estes compostos permitem a doação do hidrogênio fenólico a um radical livre, regenerando-o e interrompendo deste modo o mecanismo de oxidação. Assim sendo, os compostos fenólicos transformam-se em radicais livres, os quais são estabilizados por ressonância (RAMALHO; JORGE, 2006).

Dentre os antioxidantes naturais ricos em compostos fenólicos, destaca-se a casca da laranja. A maioria dos antioxidantes presentes em citros, como a laranja, são vitamina C e polifenóis, especialmente flavonoides polimetoxilados, caratenóides, terpenóides, como o limoneno e linalol (BERMEJO et al., 2011). Em virtude do seu alto poder redutor, o ácido ascórbico, oferece proteção contra as reações oxidativas, enquanto, os polifenóis apresentam função de estabilizar os radicais livres (KLIMCKAC et al., 2007; JAYAPRAKASHA; PATIL, 2007).

Outra importante fonte de compostos fenólicos, é a película do amendoim, um resíduo que atualmente não possui aplicações, tendo como destino a queima para geração de energia ou o tratamento de rejeitos. Estudos realizados por Bergamaschi (2010) identificou que os principais compostos fenólicos presentes no extrato etanólico da película do amendoim são a epicatequina (28,5 %) e ácido p-cumárico (13,47%). A atividade antioxidante da película de amendoim já foi relatada em alguns estudos. O'keefe e Wang (2006) evidenciaram que o extrato da película em concentrações superiores a 200ppm estendeu a vida útil e elevou a estabilidade oxidativa da carne moída bovina refrigerada. Bem como, testes conduzidos em Rancimat por Camargo (2012) comprovaram a eficiência antioxidante da película retardando a oxidação do óleo de soja.

A hortelã é uma das espécies mais populares de óleos essenciais, com diversas aplicações nas indústrias de alimentos, cosmética e farmacêutica (COSTA et al., 2012). O óleo essencial desta planta é composto por mentol, mentona, mentofurona, pineno,

limoneno, cânfora, flavonóides, apigenina, luteína, betaína, heterosídeos e ácidos orgânicos (Vaz; Jorge, 2005). Segundo Almeida et al. (2012) a atividade antioxidante (DPPH) e os compostos fenólicos (CG-MS) presente nos extratos de hortelã foram obtidas por extração soxhlet utilizando etanol como solvente. Além disso, estudos realizados por Feldmann et al. (2008) evidencia a hortelã como uma das espécies que contêm alto teor de compostos fenólicos, dentre as diferentes plantas que foram avaliadas.

Vários estudos têm demonstrado que os extratos naturais possuem um elevado poder antioxidante. Sendo assim, tendo em vista que de acordo com a ANP (2016), o biodiesel comercializado no país tem como principal matéria prima o óleo de soja e o sebo bovino, o objetivo do presente trabalho é verificar como a adição destes extratos influenciam na estabilidade oxidativa, do biodiesel de composição semelhante ao que é comercializado, com blend 80/20% (m/m) Soja/Sebo, utilizando a técnica de oxidação acelerada no equipamento Rancimat.

## **2 | METODOLOGIA**

### **2.1 BIODIESEL**

O biodiesel de estudo é sintetizado a partir de uma mistura de óleo de soja comercial da marca Soya e sebo bovino, cedido pela empresa Frimasa, na proporção de 80/20% (m/m) Soja/Sebo, utilizando como álcool primário o metanol (Química Moderna), na razão molar óleo/álcool 1:6, e como catalisador o KOH (Dinâmica), 2,35% m/m. Inicialmente, a mistura soja e sebo é exposta ao aquecimento até se tornar uma solução homogênea. Em seguida a solução é misturada ao metóxido de potássio, previamente preparado, por um tempo reacional de 30 minutos, temperatura de 60°C, sob agitação constante. Ao término dessa reação, a mistura é posta para decantar em funil de vidro, até que ocorra a completa separação entre o biodiesel, produto desejado, e a glicerina, subproduto. Após a separação, a glicerina é removida e o biodiesel é purificado com uma solução de cloreto de amônio (Merck), 5% (m/v), a fim de retirar as impurezas do meio e ajustar o pH em uma faixa de 7 a 8. Por fim, o biodiesel sintetizado é encaminhado para a etapa de secagem, onde se objetiva retirar o excesso de água proveniente da solução utilizada na purificação. Nesta etapa, o biodiesel é aquecido a uma temperatura de 110°C, durante um tempo médio de 20 a 30 minutos, sendo posteriormente resfriado a temperatura ambiente e armazenado em vidro de âmbar.

### **2.2 EXTRAÇÃO DE ADITIVOS**

Os aditivos naturais utilizados no presente trabalho são a película do amendoim, cedida pela empresa Coplana, folhas de hortelã e casca de laranja, ambos adquiridos comercialmente. Inicialmente cada aditivo foi posto em um cartucho, o qual foi

tampado com algodão e colocado em extratores Soxhlet (Fisatom). Em seguida, são adicionados cerca de 200 mL de etanol PA (Química Moderna) em um balão de fundo chato, o qual foi aquecido até sua evaporação. O vapor do solvente, etanol, ao chegar ao condensador retorna a sua fase líquida e entra em contato com o cartucho, solubilizando os compostos de interesses dos respectivos aditivos. Esse processo se repete até uma quantidade considerada seja extraída, sendo a cor do solvente um indicativo do mesmo.

Após o processo descrito acima, a solução é encaminhada para a etapa de secagem, com o intuito de separar solvente e aditivo. Para este processo, utilizou-se um rotaevaporador (Fisatom), com um banho de aquecimento a 80°C, sob rotação constante e auxílio de uma bomba a vácuo. Quando o solvente vaporiza, ele entra em contanto com um condensador, se liquefaz e é recuperado, enquanto o extrato do aditivo é removido e armazenado.

### **2.3 ADITIVAÇÃO DO BIODIESEL**

Nessa fase o aditivo extraído é adicionado ao biodiesel em porcentagem mássica. Após a massa de biodiesel ser pesada a quantidade de aditivo a ser adicionada é determinada através da proporção especificada, sendo esta inicialmente 1% e ao final da pesquisa 0,05 %. Em seguida, a mistura é levada a aquecimento, sob agitação constante, numa temperatura ente 90-100°C, por um tempo médio de 20 minutos.

### **2.4 AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE OXIDATIVA**

O estudo da estabilidade oxidativa é realizado no equipamento Rancimat, do fabricante Metrohm, e baseia-se na detecção de produtos voláteis de oxidação, seguindo a norma EN 14112. Esta norma é uma padronização da metodologia empregada para avaliar a estabilidade oxidativa e define inclusive a metodologia de cálculo para determinação do tempo de indução. No método empregado, 3 gramas da amostra são envelhecidas a 110°C, com um fluxo de ar de 10 L/min. O aumento acelerado da taxa de oxidação é medido pela elevação da condutividade na água Milli-Q, sendo um indicativo da decomposição dos ésteres de ácidos graxos e pela formação de voláteis solúveis em água (KNOTHE; GERPER; KRAHL, 2005). Tais compostos foram expressos através de uma curva de condutividade elétrica versus o tempo, na qual o período de indução ou estabilidade à oxidação pode ser calculado pela intersecção de duas linhas: a tangente de inclinação e a outra tangente nivelada à curva.

O resultado desta análise é apresentado como período ou tempo de indução, ao qual representa o tempo necessário para a amostra atingir 200  $\mu$ S de condutividade. Atualmente, a Resolução n° 45/2014 da ANP preconiza um período de indução mínimo de 8 horas para o biodiesel à temperatura de 110°C. Sendo assim, quanto maior for o tempo de indução mais resistente o biodiesel é aos processos oxidativos.

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

As amostras de biodiesel puro (BP) e aditivado com os extratos da casca da laranja (BL), hortelã (BH) e película de amendoim (BA), foram submetidas ao ensaio previsto na norma EN 14112 e estão representadas no Gráfico 1. As análises foram realizadas em triplicata e as concentrações dos aditivos utilizadas nos ensaios foram de 1% (m/m).

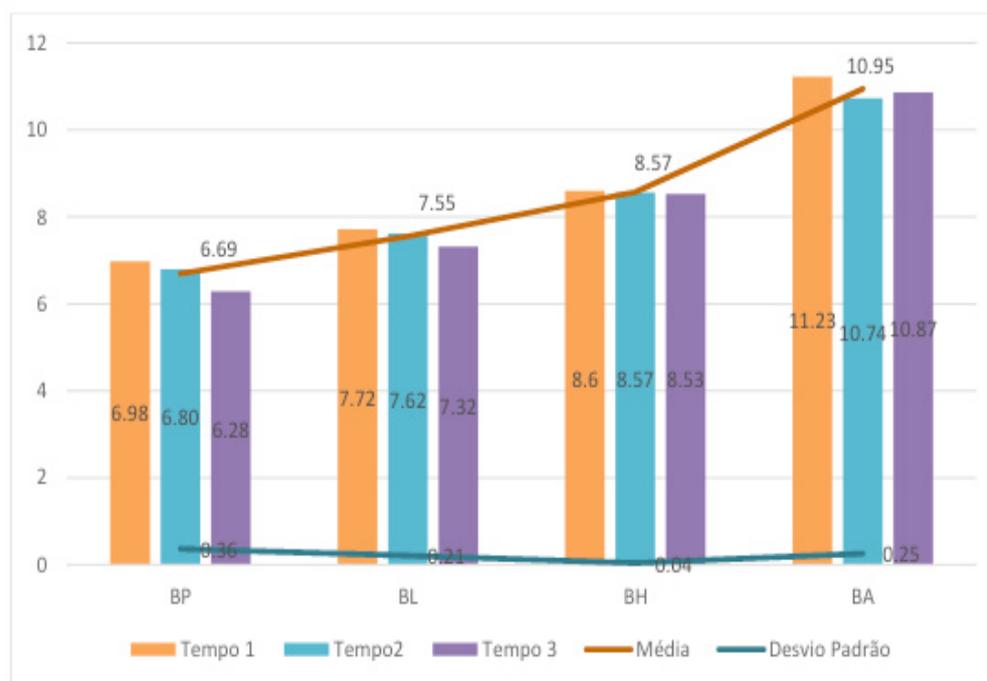


Gráfico 1. Tempo de indução do biodiesel puro e aditivado com 1% (m/m).

No que se refere ao estudo da estabilidade oxidativa, os resultados do Rancimat contidos no Gráfico 1, explicitam como 6,69 horas o tempo de indução médio do biodiesel puro, que por sua vez, não atingiu o limite mínimo de 8 horas que a ANP, órgão que regulamenta a qualidade dos combustíveis no país, exige para a comercialização deste biocombustível. As amostras de biodiesel que foram aditivadas com os extratos da casca de laranja, hortelã e película do amendoim, obtiveram respectivamente 7,55, 8,57 e 10,95 horas de tempo médio de indução.

Diante de todas as amostras aditivadas e testadas na primeira etapa desta pesquisa, verifica-se que, para a concentração utilizada, a casca da laranja não foi eficaz em estabilizar o biodiesel de estudo, tendo um aumento do tempo de indução de apenas 13,43 %. Enquanto, os extratos de hortelã e da película do amendoim elevaram o tempo de indução em 28,36 % e 63,38 % respectivamente, quando comparado ao biodiesel puro, sendo que ambos os aditivos conseguiram atender a especificação mínima da estabilidade oxidativa exigida pela ANP.

Em virtude do exposto, verifica-se que a película de amendoim foi o aditivo que mais elevou o tempo de indução do *blend* de estudo. Sendo assim, visando analisar o desempenho deste aditivo, a segunda etapa desta pesquisa buscou avaliar o efeito

que a variação da concentração acarreta na estabilidade oxidativa. A concentração de aditivo inicialmente utilizada foi de 1% (m/m), no entanto, a fim de diminuir a quantidade de extrato, com o intuito de tornar o processo mais viável economicamente, a proposta foi reduzir a concentração. No Gráfico 2 estão presentes os resultados das novas análises realizadas no Rancimat para adição de 0,1% e 0,05% da película de amendoim no biodiesel de estudo.

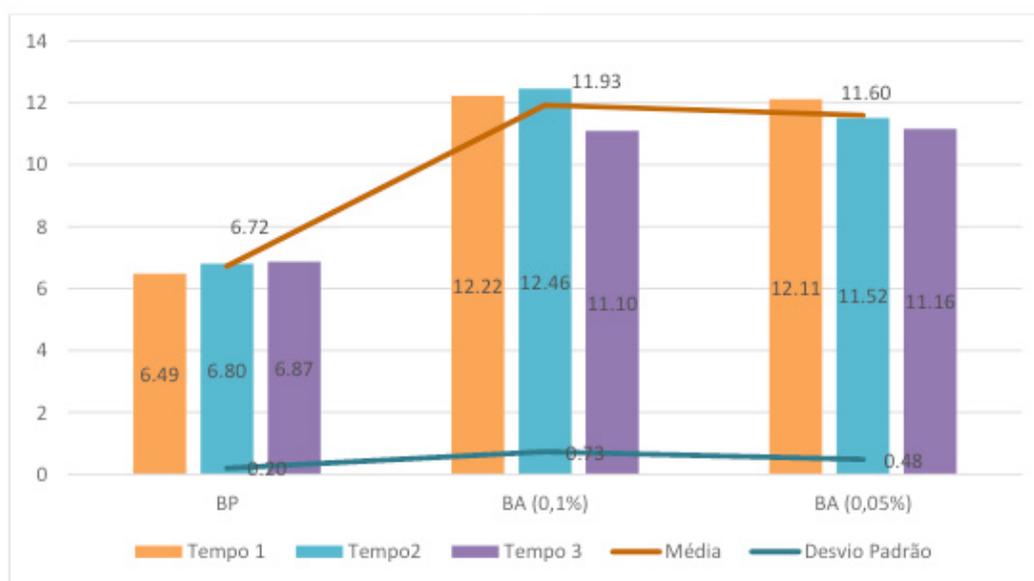


Gráfico 2: Tempo de indução do biodiesel puro e aditivado com película de amendoim 0,05% (m/m)

Nos dados apresentados no Gráfico 2, verifica-se que o tempo de indução do biodiesel de estudo para as concentrações de 0,1% e 0,05% são de 11,93 e 11,60 horas respectivamente. Dessa forma, levando em consideração o desvio padrão das análises, verifica-se que a variação de concentração utilizada não altera de forma significativa o tempo de indução, logo o menor valor passou a ser adotado como objeto de estudo para análises futuras. Ademais, de acordo com o Gráfico 2, para esta nova batelada, o biodiesel puro obteve um tempo de indução médio de 6,87 horas, sendo que a adição da película de amendoim, na concentração escolhida de 0,05 %, elevou esse tempo em 68,85% .

#### 4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dentre os aditivos examinados nesta pesquisa, para concentração 1% (m/m), o extrato da película de amendoim é o que apresenta melhor resultado na estabilização do biodiesel 80/20% (m/m) Soja/Sebo, elevando o período de indução do blend de estudo em 63,85 %. Além disso, verificou-se que a casca da laranja não demonstra ação antioxidante relevante para este biocombustível, já o extrato de hortelã apesar de exibir efeito antioxidante significativo, este é inferior quando comparado a película de amendoim.

As análises realizadas com a adição da película de amendoim nas concentrações de 1%, 0,1% e 0,05% (m/m), mostram que estas variações de concentrações não alteram de forma relevante a estabilidade oxidativa do blend de estudo, sendo a de 0,05% selecionada para análises futuras. Desta maneira, torna-se possível reduzir em vinte vezes a quantidade de aditivo necessária para aditar o biodiesel 80/20% (m/m) Soja/Sebo, obtendo resultados semelhantes e reduzindo custos de operação.

Em virtude do exposto, verifica-se que os resultados encontrados estão de acordo com Vilela (2014), o qual sugere que a adição de antioxidantes eleva o tempo de indução do biodiesel a períodos acima do estabelecido pela ANP, aumentando o seu tempo de estocagem e favorecendo a comercialização deste produto.

## 5 | AGRADECIMENTOS

Agradecemos a FAPESB pelo apoio financeiro, a Coplana por ceder a película de amendoim, a UFBA e ao IBTR por fornecer os equipamentos, e a UNIFACS por disponibilizar o uso dos laboratórios para a realização da presente pesquisa.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil). Resolução nº 45, de 25 de agosto de 2014. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 26 de agosto de 2014. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=274064>>. Acesso em: 10 fev. 2019.

ALMEIDA, P., P.; **Extração de óleo essencial de Hortelã (*Mentha spicata* L.) com misturas de Solventes a alta pressão**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Alimentos. Universidade Federal de Santa Clara, Florianópolis, 2006.

ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis), **Boletim mensal do biodiesel**, Brasília, DF, setembro 2016. Disponível em <[http://www.anp.gov.br/wwwanp/images/publicacoes/boletinsanp/Boletim\\_Mensal\\_do\\_Biodiesel/Boletim\\_Biodiesel\\_SETEMBRO\\_2016\\_FVP.pdf](http://www.anp.gov.br/wwwanp/images/publicacoes/boletinsanp/Boletim_Mensal_do_Biodiesel/Boletim_Biodiesel_SETEMBRO_2016_FVP.pdf)>. Acesso em: 10 fev. 2019.

ARAÚJO, J. M. A. **Química de Alimentos: teoria e prática**. 3ª Ed. Viçosa: UFV, 2004. 478 p.

BERGAMASCHI, K. B. **Capacidade antioxidante e composição química de resíduos vegetais visando seu aproveitamento**. 2010. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

Botrel, P. P.; Bertolucci, S. K. V.; Pinto, J. E. B. P.; Ferraz, V.; Figueiredo, F. C.; Corrêa, R.M. Composição química do óleo essencial de hortelã do campo (*Hyptis marruboides*) em função da sazonalidade. IV **Simpósio Brasileiro De Óleos Essenciais**. Fortaleza, nov, 2007.

BOUAID, A; MARTINEZ, M; ARACIL, J. Long storage stability of biodiesel from vegetable and used frying oils. **Fuel**, v.86, p. 2596-2602, 2007.

CAMARGO, A. C. **Efeitos físico-químicos da radiação gama no amendoim e a utilização da sua película como antioxidante natural**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

EM 14112, **Determination of oxidation stability (accelerated oxidation test). European Committee for Standardization**. Berlin, 2003.

JAYAPRAKASHA, G. K.; PATIL, B. S. In vitro evaluation the antioxidante activities in frui extracts from citron and blood Orange. **Food Chemistry**, v. 101, n.1, p.410-418,2007.

KARAVALAKIS, G.; STOURNAS, S.; KARONIS, D. Evaluation of the Oxidation Stability of Diesel/ Biodiesel Blends. **Fuel**, 89:2483-2489, 2010.

KLIMCZAK, I. et al. Effect of storage on the contente of polyphenols, vitamin C and antioxidante activity of Orange juices. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 20, n. 3-4, p.313-322, 2007.

KNOTHE, G.; GERPEN, J. V.; KRAHL, J. The biodiesel handbook. Illinois: **AOCS Press**, 286 p. 2005.

O'KEEFE, S. F., WANG, H. Effects of peanut skin extract on quality and storage stability of beef products. **Meat Science**, Barking, v. 73, n. 2, p.278-286, 2006.

RAMALHO, V. C., JORGE, N. Antioxidantes utilizados em óleos, gorduras e alimentos gordurosos. **Química Nova**, v. 29, n. 4, p. 755-760, 2006

SOUZA, C., M., M.; SILVA, H., R.; VIEIRA, G., M., Jr.; AYRES, M., C., C.; COSTA, C., L., S.; ARAÚJO, D., S.; CAVALCANTE, L., C., D.; BARROS, D., S.; ARAÚJO, P., B., M.; BRANDÃO, M., S.; CHAVES, M., H.; Fenóis totais e atividade antioxidante de cinco plantas medicinais. **Química Nova**. Vol. 30. No. 2, 351-355, 2007

VAZ, A., P., A.; JORGE, M., H., A.; **Hortelã**. In: Embrapa. 2005.

VILELA, R. F. **Avaliação de aminas aromáticas como antioxidantes para biodiesel**. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Química, UFPB, João Pessoa, 2014

WAYNICK, J. A. Characterization of biodiesel oxidation and oxidation products. Texas: **SwRI Project**, 2005. 51 p.

WILSON, S.D. A produção do biodiesel: uma perspective para a agroenergia no Nordeste brasileiro; In: O futuro da indústria: biodiesel (coletânea de artigos), Brasília: **MDIC-ST/IEL**, p. 27-36, 2006.

XIN, J.; SAKA, S. Test methods for the determination of biodiesel stability. **Biofuels**, 1(2), 1-15, 2010.

## AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE SEVERIDADE DE SECA DE PALMER (PDSI) PARA O MUNICÍPIO DE CRUZ ALTA/RS

### **Suélen Cristiane Riemer da Silveira**

Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água  
Pelotas – RS

### **Claudia Fernanda Almeida Teixeira-Gandra**

Universidade Federal de Pelotas, Centro de Engenharias, Curso de Engenharia Agrícola  
Pelotas – RS

### **Rita de Cássia Fraga Damé**

Universidade Federal de Pelotas, Centro de Engenharias, Curso de Engenharia Agrícola  
Pelotas – RS

### **Marcia Aparecida Simonete**

Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Curso de Engenharia Florestal  
Lages – SC

### **Emanuele Baifus Manke**

Universidade Federal de Pelotas, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Curso de Engenharia Hídrica  
Pelotas – RS

### **Maria Clotilde Carré Chagas Neta**

Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água  
Pelotas – RS

### **Henrique Michaelis Bergmann**

Universidade Federal de Pelotas, Faculdade

de Agronomia Eliseu Maciel, Programa de Pós-Graduação em Manejo e Conservação do Solo e da Água  
Pelotas – RS

**RESUMO:** Os impactos da seca têm influência direta nas atividades agrícolas e econômicas no estado, refletindo-se na baixa disponibilidade de umidade no solo, o que torna o suprimento de água às culturas insuficiente para repor as perdas. Pesquisar a influência da seca na disponibilidade de recursos hídricos, como sua caracterização para identificação de períodos secos, poderá possibilitar o monitoramento dos seus efeitos, auxiliando no planejamento e na diminuição dos seus impactos. Para tanto são utilizados alguns índices de secas que possibilitam quantificar e classificar este fenômeno. Desta forma, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o Índice de Severidade de Seca de Palmer, utilizando a classificação do mesmo para avaliar seu comportamento e suas alterações, ao longo do tempo, na localidade de Cruz Alta/RS. Para tanto foram utilizados dados de temperatura média do ar e de precipitação pluvial fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia e pela Agência Nacional de Águas, contemplando um período de 35 anos de dados (1980 a 2015). Para o cálculo do PDSI foram utilizadas equações do balanço

hídrico climatológico pelo método de Thornthwaite (1948), adotando uma capacidade de água disponível no solo de 100 mm. Os resultados mostraram que na maioria dos períodos analisados foram classificados como de seca suave a moderada, e períodos extremamente úmidos. No período que varia de 1983 a 1988 verifica-se que houve um período de seca classificado como suave a severa. Ocorreram meses classificados na categoria de seca severa em apenas 4% de toda a série e 7% para a classe severa.

**PALAVRAS-CHAVE:** Seca agrícola, severidade de seca, balanço hídrico climatológico.

**ABSTRACT:** The impacts of drought have a direct influence on agricultural and economic activities in the state, reflecting the low availability of moisture in the soil, which makes insufficient water supply to replenish losses. Research on the influence of drought on the availability of water resources, such as its characterization to identify dry periods, may enable monitoring of its effects, helping to plan and reduce its impacts. For this, some dry indexes are used to quantify and classify this phenomenon. The objective of this work was to evaluate the Palmer Drought Severity Index, using the classification of the same to evaluate its behavior and its changes, over time, in Cruz Alta/RS. In order to do so, we used mean air temperature and rainfall data provided by the National Instituto Nacional de Meteorologia and the Agência Nacional de Águas, covering a period of 35 years of data (1980 to 2015). For the PDSI calculation, climatological water balance equations were used by the Thornthwaite method (1948), adopting an available soil water capacity of 100 mm. The results showed that in the majority of the analyzed periods they were classified as mild to moderate dry, and extremely humid periods. In the period that varies from 1983 to 1988 it is verified that there was a period of drought classified as mild to severe. There were months classified in the category of severe drought in only 4% of the whole series and 7% for the severe class

**KEYWORDS:** Agricultural drought, severity of drought, climatological water balance.

## 1 | INTRODUÇÃO

A seca é uma anomalia que ocorre em todos os regimes climáticos com alta ou baixa precipitação pluvial e pode afetar milhões de pessoas, refletindo-se na baixa disponibilidade de umidade no solo. Esse fenômeno corresponde a uma característica temporária do clima de uma região, decorrente de precipitações abaixo da normal. Os impactos da seca têm influência direta nas atividades agrícolas e na economia (SANTOS, 2008).

Segundo a Emater-RS, os prejuízos no Rio Grande do Sul decorrentes de eventos relacionados ao baixo déficit hídrico já somam mais de R\$ 350 milhões. As atividades econômicas desenvolvidas no RS como pecuária bovina, a pecuária ovina, o plantio de arroz e o plantio de soja, entre outros, sofrem grande impactos tanto no desenvolvimento quanto na arrecadação do Estado.

O monitoramento dos períodos de secas pode ser realizado através do emprego de vários índices, possibilitando o desenvolvimento de um sistema de acompanhamento

das características dos períodos problemáticos, assim como as possíveis medidas a serem tomadas, de acordo com os valores atingidos por tais parâmetros. Desta forma, a investigação da distribuição espacial e temporal dos períodos de secas, quando da utilização dos referidos índices, tem sido considerado satisfatório (BLAIN e BRUNINI, 2007; FERNANDES et al., 2010).

Um dos índices mais utilizados e mundialmente reconhecidos para a quantificação da seca é o Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI), estabelecido por Palmer (1965), que considera o total de precipitação mensal, o balanço hídrico e a evapotranspiração. Palmer (1965) desenvolveu o PDSI, a partir de definições de períodos secos, como sendo um espaço de tempo, de um modo geral, de ordem de meses ou anos de duração, no qual o suprimento de água é menor do que o climaticamente esperado ou apropriado. O PDSI é amplamente utilizado pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos para determinar quando financiar a assistência de emergência à seca.

Diante da problemática atual da seca são necessários estudos que busquem analisar o comportamento das mesmas, tanto a nível local quanto regional. Nesse sentido objetivou-se avaliar o Índice de Severidade de Seca de Palmer, utilizando a classificação do mesmo para avaliar seu comportamento e suas alterações, ao longo do tempo, na localidade de Cruz Alta/RS.

## 2 | METODOLOGIA

Foram utilizados dados de precipitação mensal, temperatura máxima e temperatura mínima mensal, do período de 1980 a 2015 (35 anos) da localidade de Cruz Alta/RS (estação 2835005; 28°37'28"S; 53°36'12"W; a 432 m de altitude) obtidos da Agência Nacional de Águas (ANA) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A partir dos valores de temperaturas máxima e mínima obteve-se a média das mesmas, necessária para o cálculo da evapotranspiração potencial, determinada pelo método proposto por Thornthwaite (1948), adotando uma capacidade de água disponível (CAD) de 100 mm. O PDSI considera que o total de precipitação exigida, para manter uma área sob condições econômicas estáveis, depende da média histórica dos elementos meteorológicos e das condições hídricas dos meses precedentes e do mês considerado. Para calcular os parâmetros “Climaticamente Apropriados às Condições Existentes (CAFEC)” foram considerados os seguintes coeficientes:

Coeficiente de evapotranspiração:

$$\alpha = \frac{\overline{ET_r}}{\overline{ET_0}} \quad (1)$$

Coeficiente de recarga:

$$\beta = \frac{\bar{R}}{PR} \quad (2)$$

Coeficiente de escoamento:

$$\gamma = \frac{\overline{RO}}{PRO} \quad (3)$$

Coeficiente de perda:

$$\delta = \frac{\bar{L}}{PL} \quad (4)$$

Esses coeficientes são usados para calcular os valores CAFEC de evapotranspiração ( $\hat{ET}$ ), de recarga ( $\hat{R}$ ), de escoamento ( $\hat{RO}$ ), de perda ( $\hat{L}$ ) e de precipitação ( $\hat{P}$ ), como segue:

$$\hat{ET} = \alpha \cdot ETo \quad (5)$$

$$\hat{R} = \beta \cdot PR \quad (6)$$

$$\hat{RO} = \gamma \cdot PRO \quad (7)$$

$$\hat{L} = \delta \cdot PL \quad (8)$$

$$\hat{P} = \hat{ET} + \hat{R} + \hat{RO} - \hat{L} \quad (9)$$

Para que o índice fosse comparável em diferentes localidades e em qualquer período, Palmer (1965) propôs um fator de ponderação designado pela letra K (Equação 10).

$$K = \frac{17,67 \cdot K'}{\sum_1^{12} \hat{DK}'} \quad (10)$$

em que,

$$K' = 1,50 \cdot \log_{10} \left[ \frac{\left( \frac{\overline{ET_0} + \overline{R} + \overline{RO}}{\overline{P} + \overline{L}} + 2,80 \right)}{\overline{D}} \right] + 0,50 \quad (11)$$

$\overline{D}$  - média mensal dos valores absolutos de d'.

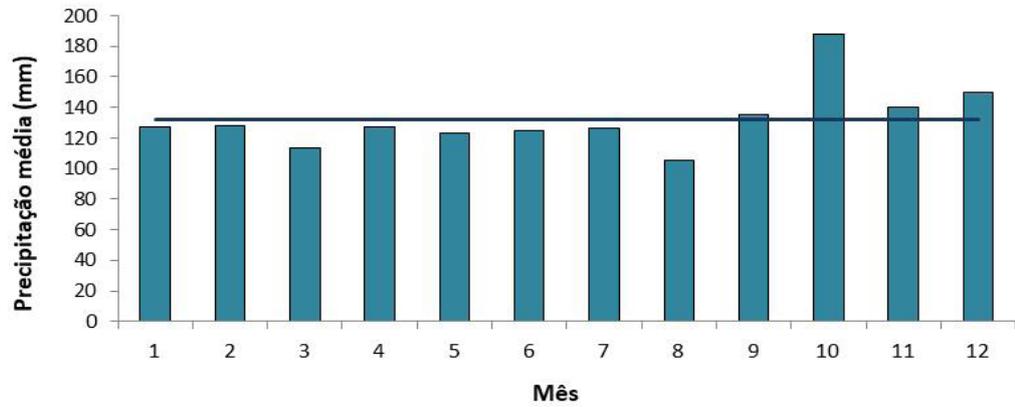
O produto entre o fator K de caracterização climática e a anomalia hídrica resulta em um índice de anomalia de umidade (índice Z). Após são selecionados os períodos mais secos e realizada a regressão linear com os valores de Z, buscando-se obter melhor ajuste. Na Tabela 1 é apresentada a classificação da intensidade da seca, de acordo com o PDSI.

PDSI	Categoria
0,49 a -0,49	Normal
-0,50 a -0,99	Seca Inicial
-1,00 a -1,99	Seca Suave
-2,00 a -2,99	Seca Moderada
-3,00 a -3,99	Seca Severa
$\leq -4,00$	Seca Extrema

**Tabela 1.** Classificação da intensidade da seca, de acordo com o Índice de Severidade de Palmer (PDSI) (PALMER, 1965)

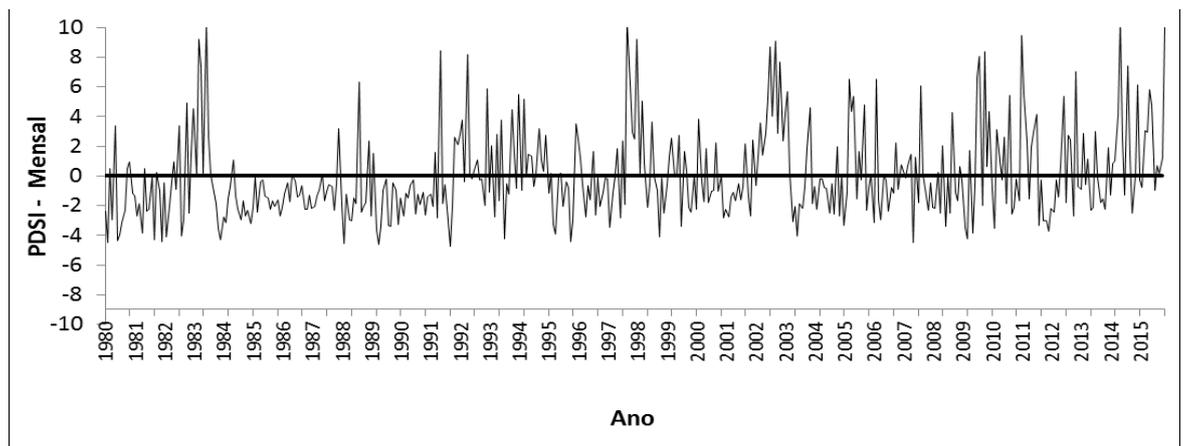
### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 são apresentados os valores das médias mensais totais de precipitação do período de 1980 a 2015, bem como a média total anual, que foi de 132,4 mm, para a localidade de Cruz Alta/RS.



**Figura 1.** Médias totais mensais e anual de precipitação no período de 1980 a 2015, para a localidade de Cruz Alta/RS

Observa-se que nos meses de setembro, outubro, novembro e dezembro, os valores médios foram superiores à média total, enquanto nos restantes dos meses foram menores. O mês de agosto foi o que alcançou a menor média (105,3 mm), caracterizando-se como o período menos chuvoso. Na Figura 2 é apresentado o comportamento mensal do Índice PDSI, o qual variou de valores positivos, que denotam períodos úmidos, a valores negativos, para períodos secos.



**Figura 2.** Comportamento do Índice de Severidade de Seca de Palmer (PDSI) para o período de 1980 a 2015.

O índice PDSI apresentou alguns valores de seca severa e extrema, sendo observado que a maioria dos períodos correspondem a seca suave a moderada, e períodos extremamente úmidos. No período que varia de 1983 a 1988 verifica-se que houve um período de seca classificado como suave a severa.

Considerando-se a classe de seca severa, cujos valores de PDSI variam de -3,00 a -3,99 (Tabela 1), foram encontrados em 31 meses da série. É importante ressaltar a sequência de dois meses de seca severa nos meses de maio e junho de 1988, setembro e outubro de 1989 e abril e maio de 1995; e três meses consecutivos de seca severa em novembro e dezembro de 2011 e janeiro de 2012. Para a seca extrema ( $\leq -4,00$ ) houve a ocorrência em 17 meses, no período analisado, sendo os anos de

1980 e 1982, com três meses, fevereiro, junho e julho; janeiro, março e setembro, respectivamente. Ocorreram eventos com apenas um mês de seca extrema nos anos de 1981, 1984, 1988, 1989, 1991, 1993, 1995, 1998, 2003, 2007 e 2009.

Limeira et al. (2007) calcularam o PDSI para a Paraíba, no período entre 1979 e 1983, cujos resultados encontrados mostraram que no ano de 1983 ocorreu seca severa (-3,00 a -3,99), segundo a classificação de Palmer. O PDSI apresentou-se coerente com a climatologia no local estudado, não apresentando resultados distorcidos, em comparação com os eventos de chuva observados, dentro do período analisado.

A seca agrícola ocorre quando a diminuição da precipitação conduz a uma redução significativa da disponibilidade de água no solo, com efeito direto nas culturas, que resulta em considerável diminuição na produtividade agrícola. Assim, torna-se importante avaliar qual ou quais os períodos mais críticos em termos de disponibilidade hídrica, para o planejamento das culturas, associando o melhor balanço entre a água disponível e a necessidade hídrica das culturas, sem gerar riscos à produtividade.

## 4 | CONCLUSÕES

Na análise do Índice de Severidade de Seca de Palmer, na localidade de Cruz Alta/RS, para o período de 1980 a 2015 (35 anos), verificou-se que ocorreram meses classificados na categoria de seca severa em apenas 4% de toda a série e 7% para a classe severa. Para a maioria do período, a seca foi classificada como suave a moderada.

## REFERÊNCIAS

BLAIN, G.C.; BRUNINI, O. **Análise comparativa dos índices de seca de Palmer, Palmer adaptado e índice padronizado de precipitação no estado de São Paulo**. Revista Brasileira de Meteorologia, v.22, n.1, p.105-111, 2007.

FERNANDES, D.S.; HEINEMANN, A.B.; PAZ, R.L.F.E.; AMORIM, A.O. Desempenho de índices quantitativos de seca na estimativa da produtividade de arroz de terras altas. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.45, n.8, p.771-779, 2010.

PALMER, W.C. **Meteorological drought**. US Weather Bureau, (Research Paper, nº45). Washington, 58p, 1965.

SANTOS, R. S. **Avaliação da seca/produtividade agrícola considerando cenários de mudanças climáticas**. 70f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola). Universidade de Viçosa. Viçosa-MG. 2008.

THORNTHWAITE, C. W. **An approach toward rational classification of climate**. Geographical Review, v.38; p.55–94, 1948.

## AVALIAÇÃO DO SUCO MISTO DE ACEROLA COM MANJERICÃO

### **Michele Alves de Lima**

Universidade Federal do Piauí, Departamento de  
Nutrição  
Teresina – Piauí

### **Elynne Kryllen do Carmo Barros**

Universidade Federal do Piauí, Departamento de  
Nutrição Teresina – Piauí

### **Clélia de Moura Fé Campos**

Universidade Federal do Piauí, Departamento de  
Nutrição Teresina – Piauí

### **Marilene Magalhães de Brito**

Universidade Federal do Piauí, Departamento de  
Nutrição Teresina – Piauí

### **Maria Márcia Dantas de Sousa**

Universidade Federal do Piauí, Departamento de  
Nutrição Teresina – Piauí

### **Karine Aleixes Barbosa de Oliveira**

Universidade Federal do Piauí, Departamento de  
Nutrição Teresina – Piauí

### **Thamires Mendonça de Carvalho**

Universidade Federal do Piauí, Departamento de  
Nutrição Teresina – Piauí

### **Robson Alves da Silva**

Universidade Federal do Piauí, Departamento de  
Nutrição Teresina – Piauí

o manjericão (*Ocimum basilicum L.*) é rico em luteína, vitaminas A e K, betacaroteno, xantina e criptoxantina. Estes vegetais possuem atividade antioxidante e combatem os radicais livres que promovem envelhecimento precoce das células e doenças degenerativas. Objetivou-se verificar o efeito da mistura de acerola e manjericão sobre as características físico-químicas do suco misto. Foram elaboradas 4 formulações em diferentes combinações da polpa de acerola (X1) e manjericão (X2), por meio de delineamento fatorial 2 x 2. As bebidas foram analisadas quanto ao pH, °Brix, acidez e relação °Brix/acidez e os dados submetidos à análise de variância e regressão. Os resultados demonstram que a polpa e o manjericão diminuem o pH da bebida, sem ação da interação. Já com relação ao °Brix, a polpa, o manjericão e a interação, apresentam efeito positivo sobre o °Brix do suco, com destaque para a interação que apresentou p-valor de 0,000002. Quanto à acidez, houve influência apenas da interação entre eles no aumento da acidez do suco. Para a relação °Brix/acidez verificou-se que tanto a polpa, como o manjericão e a interação entre eles, aumentaram a relação do °Brix/acidez, melhorando a aceitação do suco. Assim, as respostas físico-químicas para o suco misto sofrem efeito pela interação entre a polpa e o manjericão, exceto para o parâmetro de pH, onde a polpa e o manjericão influenciam de

**RESUMO:** A acerola (*Malpighia emarginata* DC.) possui vitaminas A, B1 e B6, fósforo, ferro, potássio, magnésio, cálcio e flavonóides, destacando-se carotenóides e vitamina C. Já

forma independente.

**PALAVRAS-CHAVE:** Físico-química, Interação, Regressão.

**ABSTRACT:** It has vitamins A, B1 and B6, phosphorus, iron, potassium, magnesium, calcium and flavonoids, with carotenoids and vitamin C. The basil (*Ocimum basilicum* L.) is rich in lutein, vitamins A and K, beta-carotene, xanthine and cryptoxanthin. These vegetables have antioxidant activity and fight free radicals that promote early cell aging and degenerative diseases. The objective of this study was to verify the effect of the mixture of acerola and basil on the physico-chemical characteristics of the mixed juice. Four formulations were prepared in different combinations of the acerola pulp (X1) and basil (X2), using a 2 x 2 factorial design. The drinks were analyzed for pH, °Brix, acidity and °Brix / acidity ratio and data submitted to analysis of variance and regression. The results demonstrate that the pulp and basil reduce the pH of the beverage without interaction. With respect to °Brix, pulp, basil and interaction, have a positive effect on °Brix of juice, with emphasis on the interaction that presented p-value of 0.000002. As for the acidity, there was only influence of the interaction between them in increasing the acidity of the juice. For the Brix / acidity ratio it was verified that both the pulp and the basil and the interaction between them, increased the Brix / acidity ratio, improving the acceptance of the juice. Thus, the physico-chemical responses to the mixed juice are affected by the interaction between pulp and the basil, except for the pH parameter, where pulp and basil influence independently.

**KEYWORDS:** Physico-Chemical, Interaction, Regression.

## 1 | INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores países produtores de frutos, ficando atrás apenas da China e da Índia, ocupando o 3º lugar. Entre esses frutos um que vem ganhando destaque é a acerola (*Malpighia emarginata* DC.), devido ao seu expressivo conteúdo de vitamina C, ocupando uma área cultivada de 10.000 hectares no território nacional (FURLANETO e NASSER, 2015). É um fruto com alto conteúdo de fitoquímicos que possuem atividade antioxidante, onde o ácido ascórbico (vitamina C) contribui com cerca de 40 a 83% dessa atividade (MEZADRI et al., 2008).

A aceroleira é uma árvore perene que produz um fruto conhecido em diversos países como cereja de Barbados, cereja das Índias orientais e cereja, porém seu nome mais popular é acerola. A acerola além de alto conteúdo de vitamina C, possui também compostos fenólicos e carotenóides, que contribuem com a atividade antioxidante deste fruto (RONDÓN-GONZÁLEZ e PINO-ALEA, 2015).

Além de sua importância como antioxidante, a composição química e nutricional é constituída de 90% de umidade, 0,21g de proteínas, 3,57g de carboidratos, vitaminas A, B1, B2 e B6, além dos minerais fósforo, cálcio e ferro (DELVA e SCHNEIDER, 2013).

Devido à sua grande produção e alta importância nutricional é bastante utilizada no processamento de alimentos, porém devido à fragilidade do fruto *in natura* há

muita perda durante a colheita, transporte, armazenamento e comercialização, uma das formas de minimizar essa perda e aproveitar o fruto, é na elaboração de sucos integrais, mistos e néctares.

Vários frutos ou partes vegetais podem ser utilizados na elaboração dessas bebidas, porém é mais comum o uso da acerola com outros frutos na elaboração de suco misto, como exemplo, acerola com juçara (SANTOS, 2017), abacaxi com acerola (SILVA et al., 2016), mas não é frequente encontrar raízes, como no suco misto de maracujá com inhame desenvolvido por Rodrigues *et al.* (2015), e folhas como o manjeriço, na elaboração de bebidas, contudo podem ser perfeitamente utilizados como mostra o Decreto nº 6.871 (BRASIL, 2009), onde define suco como:

Bebida não fermentada, não concentrada, ressalvados os casos a seguir especificados, e não diluída, destinada ao consumo, obtida da fruta madura e sã, ou parte do vegetal de origem, por processamento tecnológico adequado, submetida a tratamento que assegure a sua apresentação e conservação até o momento do consumo.

O manjeriço (*Ocimum basilicum L.*) é muito utilizado por sua função medicinal, anti-inflamatória e farmacêutica, além de ser bastante empregado como condimento, mas os seus óleos essenciais são o que mais chamam a atenção, a exemplo o linalol, eugenol, metil-chavicol, estragol, lineol, alcanfor, cineol, pineno e timol, pois possuem atividade antimicrobiana (VELOSO, 2012).

Tem ação cientificamente comprovada de forma positiva na redução do enfarte cerebral, melhora da memória e coordenação motora (BORA; ARORA; SHRI, 2011), prevenção de doença cardiovascular e antitrombótica (UMAR *et al.* 2014) e ainda é um dos constituintes das receitas conhecidas como dieta do Mediterrâneo, onde tem sido associado à redução da morbidade cardiovascular (UMAR *et al.*, 2010).

Além de sua importância na saúde, sua composição química e nutricional é constituída de 93% de umidade, 2g de proteínas, 3,6g de carboidratos, 3,3g de fibra alimentar, além dos minerais cálcio e magnésio (TACO, 2011).

A união dessas duas matérias-primas, assim como outras mais, contribui não apenas na redução do desperdício desses alimentos, mas também como um complemento nutricional do suco processado.

Um levantamento da Associação Brasileira das Indústrias de Refrigerantes e de Bebidas Não Alcoólicas (ABIR, 2018), do consumo *per capita* do mercado brasileiro de sucos e néctares realizado de 2010 a 2017 mostra que em 2017 o consumo foi de 5,31L, volume maior do que em 2016, porém menor que 2014 e 2015, isso demonstra que o mercado de bebidas não alcoólicas precisa inovar e trazer novos sabores e funcionalidades, visto que o consumidor está preocupado não apenas em consumir o alimento, mas com quais os benefícios que eles podem ter consumindo-os.

## 2 | OBJETIVOS

Elaborar um suco misto de acerola com manjeriço e aplicar planejamento experimental para avaliar qual método estatístico fornece uma melhor resposta das melhores condições de formulações da bebida.

## 3 | MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 Local e período do estudo

A acerola e o manjeriço foram obtidos na Central de Abastecimento do Piauí – CEAPI em Outubro de 2017. A elaboração do suco foi realizada no Laboratório de Tecnologia de Produtos de Origem Vegetal e as análises no Laboratório de Bromatologia do Instituto Federal do Piauí.

### 3.2 Elaboração do suco

Foram elaboradas 4 formulações do suco misto de acerola com manjeriço, testando diferentes combinações da polpa de acerola (X<sub>1</sub>) e manjeriço (X<sub>2</sub>), por meio do planejamento experimental do tipo Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) com duas variáveis independentes (polpa de fruta e sacarose) com variação de dois níveis totalizando quatro ensaios, como podem ser observados nas Tabelas 1 e 2.

Variáveis dependentes	Unidade	Variáveis codificadas	
Polpa de fruta (X <sub>1</sub> )	(%)	-1	+1
Sacarose (X <sub>2</sub> )	(%)	-1	+1

**Tabela 1.** Níveis das variáveis para formulação do suco misto de acerola com manjeriço.

Fonte: Dados da Pesquisa (2017).

Ensaio	Variáveis codificadas		Variáveis reais	
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>
1	-1	-1	35	1,5
2	-1	+1	35	2,5
3	+1	-1	45	1,5
4	+1	+1	45	2,5

**Tabela 2.** Matrix completa do planejamento para formulação do suco misto de acerola com manjeriço.

Fonte: Dados da Pesquisa (2017).

### 3.3 Análises físico-químicas

Foram realizadas análises de pH, °Brix, acidez e ratio °Brix/acidez (variáveis dependentes), todas em triplicata de acordo com a AOAC (2005). Os resultados foram

tratados com a Análise de Variância e Análise de Regressão no programa Statistica versão 7.0.

#### 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3 encontram-se os resultados dos parâmetros físico-químicos do suco misto de acerola com manjeriço. Pela Análise de Variância pode-se observar que para pH as formulações com as menores quantidades de polpa e de manjeriço (1) e com as maiores quantidades de polpa e de manjeriço (4) não diferiram entre si a 5% de significância e apresentaram o menor valor de pH das 4 formulações (3,51 e 3,50, respectivamente) e a que tinha maior quantidade de manjeriço e a menor de polpa (2) foi a que apresentou maior pH (3,70), que diferiu de todas as demais. O pH encontrado foi próximo aos encontrados em suco de acerola por Fernandes et al. (2004) e Araújo et al. (2016) em torno de 3,3.

Baixos valores de pH em bebidas é um fator positivo na inibição do crescimento de microrganismos, o que aumenta a sua vida-de-prateleira (GOMES *et al.*, 2012).

Para °Brix todas as formulações diferiram entre si a 5% de significância e demonstraram que à medida que aumentava a quantidade de polpa e manjeriço, aumentava também o °Brix do suco, cabendo observar que a formulação com menor quantidade de polpa e maior de manjeriço (2) apresentou °Brix menor do que a com maior quantidade de polpa e menor de manjeriço (3), mostrando assim que a polpa teve maior influência sobre o °Brix do que o manjeriço.

Os sólidos solúveis são um indicativo da doçura e palatabilidade do alimento, quanto maior seu teor, mais sólidos (em sua maioria açúcares) terá o produto em questão. Em suco misto de acerola com mamão, limão, couve e hortelã, Souza (2016) encontrou uma variação de 11,88 a 13,58 °Brix, resultado semelhante ao encontrado para o suco de acerola com manjeriço neste estudo.

Todos os resultados para acidez diferiram entre si, observando-se que houve um aumento gradual de acidez nas formulações 1, 2 e 3, porém na formulação 4 o valor de acidez caiu, demonstrando que há um máximo de acidez (8,05) até 45% de polpa e 1,5% de manjeriço (3), quando são usadas as máximas quantidades de polpa e manjeriço (45% e 2,5%, respectivamente) (4), a acidez tende a um declínio.

A acidez é um dos parâmetros que podem indicar o estado de conservação do produto, onde essa acidez pode ser aumentada devido reações de degradação e deterioração do alimento (NASCIMENTO *et al.*, 2018). Porém a alta acidez do suco misto é devido ao alto conteúdo de ácidos presentes na acerola e no manjeriço.

A formulação 1 (35% de polpa e 1,5% de manjeriço), que tem as menores quantidades de polpa e manjeriço, se apresentou com a maior relação °Brix/acidez (1,80), que diferiu significativamente a 5% das outras três formulações que não diferiram entre si. Diante desse resultado observa-se que a formulação 1 é a que estaria mais propensa à aceitação em um teste sensorial, pois significa que o suco

está menos ácido e mais doce, o que favorece a aceitação.

A relação ou ratio °Brix/acidez, que é um equilíbrio entre o sabor doce e o ácido, em frutos pode ser indicativo do grau de maturação e em produtos prontos é utilizada como uma medida de sabor importante que influencia na aceitabilidade pelo consumidor. Uma alta relação indica que o alimento possui um sabor mais agradável do que o com uma baixa relação (ZORZAL, 2015).

Formulações	pH	°Brix	Acidez	°Brix/Acidez
1	3,51 <sup>a</sup>	11,40 <sup>a</sup>	6,28 <sup>a</sup>	1,80 <sup>a</sup>
2	3,70 <sup>b</sup>	12,19 <sup>b</sup>	7,90 <sup>b</sup>	1,52 <sup>b</sup>
3	3,56 <sup>c</sup>	12,30 <sup>c</sup>	8,05 <sup>c</sup>	1,52 <sup>b</sup>
4	3,50 <sup>a</sup>	12,41 <sup>d</sup>	6,37 <sup>d</sup>	1,50 <sup>b</sup>

\*Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem ( $p \geq 0,05$ ). Fonte: Dados da pesquisa (2017).

**Tabela 3.** Resultados dos parâmetros físico-químicos do suco misto de acerola com manjerição.

Pela Análise de Regressão pode-se observar que polpa e manjerição tiveram influência sobre o pH (Tabela 4) quando analisados separadamente, porém a interação entre eles não exerce essa influência quando analisados a 5% de probabilidade.

Fatores	Coefficiente de regressão	Erro padrão	T	p-valor
P (L) x M (L)	3,725	0,191572	19,44434	3,291633
Polpa (L)	-0,00733	0,004257	-1,72259	-0,01696
Majerição (L)	0,07	0,042572	1,644287	-0,0263

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade.  $R^2 = 38,65\%$ . L=efeito linear Fonte: Fonte: Dados da Pesquisa (2017).

**Tabela 4.** Coeficiente de regressão para a resposta pH.

Já com relação ao °Brix (Tabela 5) tanto polpa e manjerição separados e a interação entre eles foram significativos ( $p < 0,05$ ) demonstrando que há influência sobre o °Brix do suco, havendo um destaque para a interação que apresentou p-valor de 0,000002, demonstrando assim que existe uma grande interação entre os dois e que essa interação tem uma forte influência sobre o °Brix.

Fatores	Coefficiente de regressão	Erro padrão	T	p-valor
P (L) x M (L)	9,160833	0,673057	13,61078	0,000002
Polpa (L)	0,055833	0,014957	3,732965	0,004676
Majerição (L)	0,341667	0,149568	2,284352	0,048218

significativo ao nível de 5% de probabilidade.  $R^2= 68,03\%$ . L= efeito linear

**Tabela 5.** Coeficiente de regressão para a resposta °Brix

Fonte: Dados da Pesquisa (2017).

A 5% de probabilidade para acidez (Tabela 6) apenas a interação entre polpa e manjerição foi significativa, portanto, polpa e manjerição isoladamente não afetam a acidez do suco.

Fatores	Coefficiente de regressão	Erro padrão	T	p-valor
P (L) x M (L)	6,723067	2,470082	2,721799	0,023538
Polpa (L)	0,012203	0,054891	0,222315	0,829032
Majerição (L)	-0,02808	0,548907	-0,05115	0,960322

significativo ao nível de 5% de probabilidade.  $R^2= 5,74\%$ . L=efeito linear

**Tabela 6.** Coeficiente de regressão para a resposta acidez.

Fonte: Fonte: Dados da Pesquisa (2017).

Para a relação °Brix/acidez (Tabela 7) verificou-se que polpa, manjerição e a interação exercem influência significativa ( $p<0,05$ ), onde mais uma vez a interação entre polpa e manjerição mostrou-se ter uma forte influência sobre o suco com um p-valor de 0,000000052.

Fatores	Coefficiente de regressão	Erro padrão	T	p-valor
P (L) x M (L)	2,504621565	0,20115822	12,451	0,000000052
Polpa (L)	-0,015443311	0,004470183	-3,45474	0,007220509
Majerição (L)	-0,147765259	0,044701827	-3,30558	0,009148211

significativo ao nível de 5% de probabilidade.  $R^2= 71,75\%$ . L=efeito linear Fonte: Fonte: Dados da Pesquisa, 2017.

**Tabela 7.** Coeficiente de regressão para a resposta °Brix/Acidez.

## 5 | CONCLUSÃO

A Análise de Variância e Teste de médias permitiu a visualização de diferenças estatísticas ou não entre as formulações de acordo com cada parâmetro analisado, permitiu ainda a comparação do comportamento dos parâmetros à medida que se altera a proporção de polpa e manjerição nas formulações analisadas. Já por meio da Análise de Regressão fica mais fácil saber se foi polpa e manjerição separados ou se a interação deles, ou ainda se todos exerceram influência sobre cada parâmetro analisado e o grau dessa influência. Dessa forma, a Análise de Regressão fornece resposta mais precisa, permitindo alterar o que realmente influencia nos parâmetros e manter sem alteração o fator que não exerce influência.

## 6 | AGRADECIMENTOS

Nosso agradecimento à CAPES.

À Universidade Federal do Piauí e ao Programa de Pós-graduação em Alimentos e Nutrição.

Ao Instituto Federal de Educação do Piauí.

## REFERÊNCIAS

ARAÚJO, A. P. O. et al. Utilização de planejamento experimental no estudo da pasteurização do suco de acerola. **Scientia Plena**, v. 12, n. 6, p. 1-8, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE REFRIGERANTES E DE BEBIDAS NÃO ALCOÓLICAS. **Néctares e sucos prontos**. 2018. Disponível em: <<https://abir.org.br/o-setor/dados/nectares/>>. Acesso em: 15 janeiro 2019.

AOAC. Association of Official Agricultural Chemists. **Official methods of analysis of the Association of Official Agriculture Chemists**. 18 ed. Washington, 2005. 1141p.

BORA, K. S.; ARORA, S.; SHRI, R. Role of *Ocimum basilicum* L. in prevention of ischemia and reperfusion-induced cerebral damage, and motor dysfunctions in mice brain. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 137, p. 1360-1365, 2011.

BRASIL. Decreto nº 6.871, de 4 de Junho de 2009. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 05 jun. 2009. Seção 1, p. 20.

DELVA, L.; SCHNEIDER, R. G. Acerola (*Malpighia emarginata* DC): Production, Postharvest Handling, Nutrition, and Biological Activity. **Food Reviews International**, v. 29, p. 107-126, 2013.

FERNANDES, A. G. et al. Sucos Tropicais de Acerola, Goiaba e Manga: Avaliação dos Padrões de Identidade e Qualidade. **Revista Ceres**, v. 307, n. 53, p. 302-308, mai./jun. 2006.

FURLANETO, F. P. B.; NASSER, M. D. Panorama da Cultura da Acerola no Estado de São Paulo. **Pesquisa e Tecnologia**, v. 12, n. 1, p. 1-6, jan./jun. 2015.

GOMES, M. J. N. et al. Análise Físico-Química de Suco de Caju Concentrado. **Centro Científico Conhecer**, Goiânia, v. 8, n. 15, p. 2019-2024, 2012.

- MEZADRI, T. et al. Antioxidant compounds and antioxidant activity in acerola (*Malpighia emarginata* D.C.) fruits and derivatives. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 21, n. 4, p. 282-290, 2008.
- NASCIMENTO, J. F. N. Análise físico-química de polpas de acerola (*Malpighia glabra* L.) artesanais e industriais congeladas. **Pubvet Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 12, n. 6, p. 1-6, jun. 2018.
- RODRIGUES, J. F. et al. Yam addition in passion fruit juice: optimization of the consumer acceptance. **Magistra**, Cruz das Almas, BA, v. 27, n. 2, p. 159-166, jan./mar. 2015.
- RONDÓN-GONZÁLEZ, M.; PINO-ALEA, J. A. Acerola (*Malpighia emarginata* DC): Composición, Procesamiento y Beneficios a la Salud. **Ciencia y Tecnología de Alimentos**, v. 25, n. 2, p. 66-73, may./ago. 2015.
- SANTOS, Gabriela Zanela dos. **Suco tropical e néctar sabores acerola, juçara e acerola com juçara: caracterização físico-química, microbiológica, sensorial e de compostos bioativos**. Rio Pomba, MG: IFET/RP, 2017. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, Instituto Federal do Sudoeste de Minas Gerais, 2017.
- SILVA, M. J. S. S. et al. Caracterização físico-química de blend de abacaxi com acerola obtido pelo método de liofilização. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, BA, v. 11, n. 5, p. 110-113, 2016.
- SOUZA, Thabata Miranda de. **Desenvolvimento de suco misto à base de acerola, mamão, limão, couve e hortelã**. Imperatriz, MA: CCSST, 2016. Originalmente apresentada como trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Maranhão, 2016.
- TACO. **Tabela Brasileira de Composição de Alimentos**. Núcleo de Estudos e Pesquisa em Alimentação. 4 ed. Campinas: NEPA/UNICAMP, 2011. 161 p.
- UMAR, A. et al. Antihypertensive effects of *Ocimum basilicum* L. (OBL) on blood pressure in renovascular hypertensive rats. **Hypertension Research**, v. 33, p. 727-730, 2010.
- UMAR, A. et al. Effect of *Ocimum basilicum* L. on cyclo-oxygenase isoforms and prostaglandins involved in thrombosis. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 152, p. 151-155, 2014.
- VELOSO, Ronice Alves. **Divergência Genética, Análise do Óleo Essencial e Bioatividade de Acessos de Manjeriço (*Ocimum basilicum* L.) no Estado do Tocantins**. Gurupi, TO: PPGPV, 2012. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, Universidade Federal do Tocantins, 2012.
- ZORZAL, Tatiane Aparecida. **Influência da Temperatura e Período de Armazenamento na Composição Química e Físico-Química de Frutos de Abacaxi da CV. Pérola**. Vitória, ES: PPGBV, 2015. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo, 2015.

## COLORIMETRIA APLICADA A ESPÉCIES FLORESTAIS EM MATO GROSSO

### **Edilene Silva Ribeiro**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso, Departamento de Agronomia  
Campo Novo do Parecis – Mato Grosso

### **Joaquim Carlos Gonçalez**

Universidade de Brasília, Faculdade de Engenharia Florestal  
Brasília – Distrito Federal

### **William Cardoso Lima**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso, Departamento de Agronomia  
Campo Novo do Parecis – Mato Grosso

### **Luzia Elaine Domingues Pimenta Vargas**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso, Departamento de Agronomia  
Campo Novo do Parecis – Mato Grosso

### **Roberta Santos Souza**

Universidade de Brasília, Faculdade de Engenharia Florestal  
Brasília – Distrito Federal

e a melhor utilização destas espécies pelo mercado madeireiro. As pranchas de madeira foram disponibilizadas pelo Imeq/MT Instituto de Metrologia e Qualidade do Estado de Mato Grosso e a confecção dos corpos de prova foi determinado pela norma Copant (1972). Foram confeccionados 20 corpos de prova de dimensões 2 cm x 2cm x 30cm utilizados para determinar a cor da madeira. A metodologia adotada para caracterização dos parâmetros colorimétricos  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C^*$  e  $h$  foi o sistema  $CIEL^*a^*b^*$ , sendo os mesmos obtidos através de um espectrofotocolorímetro. As espécies *Q. brevipedicellata*, *G. glabra*, *H. petraeum*, *A. leiocarpa*, *S. amara*, *C. cateniformis*, *V. máxima* e *L. cultratus* foram classificadas como claras e as espécies *M. itauba*, *E. uncinatum*, *M. huberi*, *D. odorata*, *T. altissima*, *D. purpurea* e *Euplassa pinnata* classificadas escuras. A colorimetria quantitativa, como técnica para a determinação da cor e diferenciação das faces radial e tangencial da madeira, mostrou-se eficiente, simples e prática. Podendo ser utilizada na pré-classificação e agrupamento de madeiras de cores semelhantes dando opções de usos e valorizando a comercialização.

**PALAVRAS-CHAVE:** Espécies Amazônicas, Colorimetria, Faces tangencial e radial

**RESUMO:** Este trabalho teve como objetivo avaliar a coloração natural da madeira espécies tropicais com grande comercialização no país e exterior utilizando a colorimetria, visando a ampliação do uso desta técnica na caracterização tecnológica da madeira

**ABSTRACT:** The objective of this work was to evaluate the natural coloration of tropical wood species with great commercialization in the country and abroad using colorimetry, aiming to increase the use of this technique in the technological characterization of wood and the best use of these species by the timber market. The boards were made available by the Imeq / MT Institute of Metrology and Quality of the State of Mato Grosso and the preparation of the test specimens was determined by the Copant (1972) standard. Twenty specimens measuring 2 cm x 2 cm x 30 cm were used to determine the color of the wood. The methodology used to characterize the colorimetric parameters  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ,  $C^*$  and  $h$  was the CIEL<sup>\*</sup>  $a^*$   $b^*$  system, and they were obtained through a spectrophotometer. The species *Q. brevipedicellata*, *G. glabra*, *H. petraeum*, *A. leiocarpa*, *S. amara*, *C. cateniformis*, *V. maxima* and *L. cultratus* were classified as clear and the species *M. itauba*, *E. uncinatum*, *M. Huberi*, *D. odorata*, *T. altissima*, *D. purpurea* and *Euplassa pinnata* classified dark. Quantitative colorimetry, as a technique for determining the color and differentiation of the radial and tangential faces of the wood, was efficient, simple and practical. It can be used in the pre-classification and grouping of woods of similar colors giving options of uses and valuing the commercialization.

**KEYWORDS:** Amazonian Species, Colorimetry, Tangential and Radial Faces

### 1 | INTRODUÇÃO

Mato Grosso vem se fortalecendo no mercado nacional e internacional como grande produtor de madeira de florestas tropicais, entre os anos de 2010 e 2017 foram comercializados cerca de 53,7 milhões de m<sup>3</sup> de madeira *in natura*, serrada e industrializada/beneficiada (CIPEM, 2019). O Estado comercializou entorno de 411 espécies de 2010 a 2014, evidenciando a grande diversidade de essências florestais (RIBEIRO, 2013).

A caracterização e a identificação orientam um melhor aproveitamento e uso, contribuindo para a utilização racional das espécies. Além disso, viabiliza introduzir madeiras menos conhecidas no mercado (GONÇALEZ et al., 2001; FARIAS, 2015). Esta caracterização vai além das propriedades anatômicas físicas e mecânicas. Outros indicadores, como a cor, os constituintes químicos, dentre outros, completam a caracterização e utilização de uma determinada espécie madeireira. Entretanto esses parâmetros são menos utilizados, talvez pela maior dificuldade da realização desses ensaios (GONÇALEZ et al., 2001; MARTINS et al., 2011).

Tendo em vista o uso final, a definição da cor se destaca como um fator importante para a determinação da qualidade da madeira, que influirá diretamente no aspecto visual e, por conseguinte, na sua comercialização (MOYA; MARIN, 2011; AMORIM, et al., 2013). Por esta razão, a análise da cor deve ser adicionada ao planejamento

objetivando a caracterização tecnológica da madeira a fim de atender aos usos mais nobres desse material (MORI et al., 2005; MESQUITA et al., 2017).

A colorimetria quantitativa é uma metodologia objetiva e eficaz para a medição da cor da madeira, e o sistema CIELAB, de 1976, é o mais utilizado nesta avaliação. Neste sistema, o parâmetro L indica a luminosidade e varia entre 0 e 100, em que zero representa o negro e 100, o branco. O parâmetro \*a indica a matriz vermelha, em que o número positivo indica o vermelho e o negativo, o verde. O b\* indica a matriz amarela, sendo que o número positivo indica o amarelo e o negativo, o azul. A saturação da cor (C) indica a pureza, ao passo que o ângulo de tinta (H) aponta a dominância de alguma tonalidade na cor (GONÇALEZ et al., 2001).

Este estudo através da técnica de colorimetria teve por objetivo determinar a cor da madeira de quinze espécies florestais e contribuir com conhecimento das características tecnológicas das essências comercializadas por Mato Grosso, visando sua valorização e utilização na indústria moveleira.

## 2 | MATERIAL E MÉTODOS

Esta pesquisa foi desenvolvida no laboratório de tecnologia da madeira do departamento de Engenharia Florestal –UnB em conjunto com o Instituto Federal de Mato Grosso-IFMT/CNP. As amostras foram disponibilizadas pelo Instituto de Metrologia e Qualidade do Estado de Mato Grosso/Brasil, e a confecção dos corpos de prova seguiu a norma COPANT (1972). Foram confeccionados 20 corpos de prova de cada espécie orientados nas seções longitudinal, radial e tangencial (30 cm x 2 cm x 2 cm) utilizados no ensaio de colorimetria. As amostras foram acondicionadas em câmara climática em condições ambientais controladas ( $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  e  $65\pm 5\%$  UR) para a manutenção da umidade de equilíbrio.

### Material lenhoso

As espécies selecionadas foram identificadas no laboratório de produtos florestais LPF/SFB em Brasília com auxílio de lupa conta fios com 10x de aumento, e estas foram comparadas com as amostras padrão da xiloteca (*Index Xylarium FPBw*) do Setor de Anatomia da Madeira confirmando a identificação de campo.

Foram caracterizadas quinze espécies: **Cambará** (*Qualea brevipedicellata* Stafleu) Família Vochysiaceae, **Cupiúba** (*Goupia glabra* Aubl.) família Goupiaceae, **Itaúba** (*Mezilaurus itauba* (Meisn.) Taub. ex Mez) família Lauraceae, **Cedrinho** (*Erismia uncinatum* Warm.) família Vochysiaceae, **Angelim Pedra** (*Hymenolobium petraeum* Ducke) família Fabaceae, **Maçaranduba** (*Manilkara huberi* (Ducke) A. Chev.) família Sapotaceae, **Garapeira** (*Apuleia leiocarpa* (Vogel) J. F. Macbr) família Fabaceae, **Cumbarú** (*Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd.) família Fabaceae, **Marupá** (*Simarouba amara* Aubl.) família Simaroubaceae, **Cedrorana**

(*Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke) família Fabaceae, **Muiracatiara** (*Tetragastris altissima* (Aubl.) Swart.) família Burseraceae, **Cambará rosinha** (*Vochysia máxima* Ducke) família Vochysiaceae, **Sucupira** (*Diplotropis purpurea* (Rich.) Amshoff.) família Fabaceae, **Louro-faia** (*Euplassa pinnata* (Lam.) I. M. Johnst.) família Proteaceae e **Embira-sapo** (*Lonchocarpus cultratus* (Vell.) A. M. G. Azevedo & H. C. Lima) família Fabaceae.

## Colorimetria

Para a realização deste ensaio foi utilizado um espectrofotocolorímetro *ColorEye*® XTH gretagmacbeth vinculado a um microcomputador com o *software* Color iControl, com iluminante *Pulsed Xenon D65* e ângulo de 10°, em temperatura ambiente. A metodologia proposta Gonzalez (1993) com base no sistema Cielab (1976), definiu os parâmetros colorimétricos L\* (claridade), coordenadas a\* e b\*, C (saturação) e h\* (ângulo de tinta). Para a especificação das cores de cada espécie utilizou-se a tabela de cores descrita por Camargos e Gonzalez (2001).

Foram utilizados 10 corpos de prova de cada espécie, realizando-se 20 medições em cada face (radial e tangencial), gerando um total de 400 leituras por espécie.

Os parâmetros colorimétricos obtidos foram L\* (luminosidade), a\* (coordenada do eixo vermelho-verde), b\* (coordenada do eixo azul-amarelo). A medição de cor foi feita na região do espectro visível, no intervalo de 400 a 700 nm, para as três seções.

Para o cálculo dos parâmetros C (saturação) e h\* (ângulo de tinta) foram utilizadas as Equações I e II, segundo o sistema CIELAB 1976.

$$C = \frac{(a^{*2}) + (b^{*2})}{2}$$
$$h^* = \tan^{-1} \left( \frac{b^*}{a^*} \right)$$

Onde: C = saturação; a\* = coordenada cromática sobre o eixo verde-vermelho; b\* = coordenada cromática sobre o eixo azul-amarelo; h\* = ângulo de tinta.

## Análise estatística

Para as análises colorimétricas foi utilizado estatística descritiva e delineamento experimental inteiramente casualizado, com dois tratamentos (radial e tangencial) e 10 repetições. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey, ao nível de 95% de probabilidade utilizando o programa ASSISTAT Versão 7.7 beta. Foi verificada a normalidade dos dados pelo teste Shapiro-Wilk (SILVA E AZEVEDO, 2002).

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores médios dos parâmetros colorimétricos para cada uma das espécies e a classificação da cor são apresentados na Tabela 1.

Espécies	L*	a*	b*	C	h*	Classificação da cor
<i>Qualea brevipedicellata</i>	65,03	10,69	25,46	27,65	67,32	Marrom-oliva
<i>Goupia glabra</i>	59,05	9,28	27,07	28,68	71,12	Oliva-amarelado
<i>Mezilaurus itauba</i>	52,03	8,70	27,19	28,61	71,93	Oliva-amarelado
<i>Erisma uncinatum</i>	55,05	11,90	22,29	25,34	62,03	Rosa-acinzentado
<i>Hymenolobium petraeum</i>	62,45	13,84	26,18	29,64	62,17	Rosa
<i>Manilkara huberi</i>	47,45	14,69	19,85	24,72	53,50	Marrom-avermelhado
<i>Apuleia leiocarpa</i>	61,92	11,34	30,96	33,00	69,83	Marrom-oliva
<i>Dipteryx odorata</i>	51,58	12,10	23,24	26,22	62,42	Marrom-claro
<i>Simarouba amara</i>	81,68	4,12	24,37	24,72	80,43	Branco-acinzentado
<i>Cedrelinga cateniformis</i>	57,96	10,58	23,31	25,65	65,47	Marrom-claro
<i>Tetragastris altissima</i>	53,81	16,94	27,42	32,23	58,30	Amarelo-amarronzado
<i>Vochysia máxima</i>	57,28	18,34	25,70	31,59	54,52	Rosa
<i>Diplotropis purpurea</i>	45,61	10,05	21,85	24,07	65,26	Oliva
<i>Euplassa pinnata</i>	56,14	15,26	24,20	28,62	57,79	Amarelo-amarronzado
<i>Lonchocarpus cultratus</i>	65,23	4,89	21,82	22,40	77,86	Branco-acinzentado

Classificação da cor de acordo com Tabela de Cores de Madeira proposta por Camargos, González (2001).

Tabela 1- Valores médios dos Parâmetros colorimétricos e classificação da cor das espécies em estudo.

As espécies florestais avaliadas neste estudo apresentaram valores de luminosidade L\* entre 45,61 e 81,68 (média = 57,84), coordenada cromática a\* entre 4,12 e 18,34 (média 11,54), coordenada cromática b\* entre 19,85 e 30,96 (média 24,70), saturação da cor C entre 22,4 e 33 (média 27,54) e ângulo de tinta h\* entre 53,50 e 80,43 (média 65,33). Corroborando com os resultados Camargos e González (2001), em estudo realizado com 350 espécies nativas do Brasil obtiveram valores médios dos parâmetros colorimétricos L\*, a\*, b\*, C, h\* são: 56,79, a\* 10,44, b\* 20,54, C 23,30 e h\* 62,18.

Ainda segundo o mesmo autor, espécies que apresentam valores do parâmetro L\* (claridade) maior que 56,79 são consideradas madeiras claras e espécies com valor do parâmetro L\* (claridade) abaixo de 56,79 são consideradas madeiras escuras. Desta forma, de acordo com a Tabela 1, a cor da madeira das espécies *Q. brevipedicellata*, *G. glabra*, *H. petraeum*, *A. leiocarpa*, *S. amara*, *C. cateniformis*, *V. máxima* e *L. cultratus* foram classificadas como claras e as espécies *M. itauba*, *E. uncinatum*, *M. huberi*, *D. odorata*, *T. altissima*, *D. purpurea* e *Euplassa pinnata* classificadas escuras.

*T. altissima* (Muiracatiara) e *E. pinnata* (Louro faia) foram classificadas como Amarelo-amarronzado. Observa-se que ambas coordenadas (a\* e b\*) atuam na cor

destas madeiras, entretanto, devido a maior influência da coordenada  $b^*$  (pigmento amarelo) que tem seu valor maior que a coordenada  $a^*$ , se encaixam no 1º quadrante do sistema Cielab 1976, mais próximo do eixo amarelo, a saturação da cor C alta para todas as espécies confirmam a cor amarelada, o  $h^*$  (ângulo de tinta) foi menor que a média para todas as espécies.

*S. amara* (Marupá) e *L. cultratus* (Embira de sapo) tiveram a cor classificada como Branco-acinzentado. A coloração destas espécies como das anteriores foram influenciadas pela coordenada  $b^*$  (amarelo) com valores acima da média, e coordenada  $a^*$  (vermelho) com valores muito abaixo da média, a tonalidade alta destas espécies ( $h^*$ ) respondem pela coloração amarela, mas a saturação da cor (C) abaixo da média confere a elas cor esbranquiçada.

*H. petraeum* (Angelim pedra) e *V. máxima* (Cambará rosinha) foram classificadas com coloração Rosa. A coloração destas espécies foi influenciada por valores acima da média tanto da coordenada  $a^*$  quanto da coordenada  $b^*$ , sendo o valor de  $b^*$  maior que o de  $a^*$  respondendo pela cor amarela. A saturação da cor das duas espécies foi alta, porém a tonalidade ( $h^*$ ) baixa, conferindo a cor rosada das madeiras.

*Q. brevipedicellata* (Cambará) e *A. leiocarpa* (Garapeira) foram classificadas Marrom-oliva. *G. glabra* (Cupiúba) e *M. itauba* (Itaúba) foram classificadas Oliva-amarelado. *D. odorata* (Cumbarú) e *C. cateniformis* (Cedrorana) foram classificadas Marrom-claro. As colorações de todas estas espécies foram influenciadas pela coordenada  $b^*$  pigmento amarelo que tem seu valor maior que a coordenada  $a^*$  responsável pelo pigmento vermelho, a saturação da cor C e a tonalidade ( $h^*$ ) foram altas para todas as espécies confirmando a cor amarela. Os intervalos dos parâmetros colorimétricos são os responsáveis pela formação desta cor nestas madeiras.

*E. uncinatum* (Cedrinho) foi classificado como Rosa-acinzentado, *M. huberi* (Maçaranduba) Marrom-avermelhado e *D. purpurea* (Sucupira) cor Oliva. As três espécies possuem o parâmetro  $L^*$  abaixo de 56,79 classificando-as como escuras, assim como todas as outras espécies a coordenada  $b^*$  (amarelo) influência na cor por ser maior que a coordenada  $a^*$  (vermelho). A saturação da cor (C) é alta para as três espécies.

Variações na cor da madeira de uma espécie podem ocorrer, pois segundo Gonzalez, (1993) diversos fatores influenciam a cor, tais como caracteres anatômicos, constituintes químicos, local de retirada da amostra na árvore, fatores ambientais, idade, altura, diâmetro, fatores ambientais e genética de cada espécie.

Silva et al. (2007) em sua pesquisa avaliou o processo de fotodecomposição da madeira de cinco espécies tropicais, ipê-roxo (*Tabebuia imeginosa*), itaúba (*Mezilaurus itauba*), maçaranduba (*Manilkara huberi*), tatajuba (*Bagassa guianensis*) e tauari (*Couratari* sp.). Os parâmetros da cor natural da madeira foram, Ipê-roxo  $L^*=34,67$   $a^*=6,71$   $b^*=9,15$  com classificação da cor oliva-amarronzado-escuro, Itaúba  $L^*=43,22$   $a^*=6,74$   $b^*=16,88$ , coloração Marrom-amarelado, Maçaranduba  $L^*=35,74$   $a^*=8,64$   $b^*=7,27$ , classificação Marrom-avermelhado-escuro, Tatajuba  $L^*=47,09$

$a^*=6,76$   $b^*=21,27$ , cor Marrom-dourado e Tauari  $L^*=50,43$   $a^*=5,72$   $b^*=15,65$  Marrom-amarelado-claro.

Gonçalez et al. (2010) estudando o efeito da radiação ultravioleta na cor da madeira de freijó (*Cordia goeldiana* Huber), espécie amazônica, obteve para as amostras padrão (testemunha) valores próximos ao desta pesquisa, sendo para o parâmetro  $L^*$  (luminosidade) = 72,00,  $a^*$  (coordenada cromática do eixo vermelho/verde) = 6,05  $b^*$  (coordenada cromática do eixo amarelo/azul) = 23,10 e C (saturação da cor) = 23,88 e  $h^*$  (ângulo de tinta) = 75,32.

Stangerlin (2012) avaliou a alteração dos parâmetros colorimétricos da madeira de *Dipteryx odorata* e *Simarouba amara* no tempo 0 e submetida ao ataque de fungos apodrecedores, encontrando valores relativamente próximos ao deste trabalho (*Dipteryx odorata*  $L^*=48,25$ ;  $a^*=9,09$ ;  $b^*=18,75$ ;  $C=20,90$ ;  $h^*=64,06$  e *Simarouba amara*  $L^*=68,99$ ;  $a^*=4,50$ ;  $b^*=22,82$ ;  $C=23,26$ ;  $h^*=78,83$ ). Para a espécie *S. amara* o autor infere ainda que alto valor de  $L^*$ , pode ser indicativo de baixa densidade da espécie, e que, em conjunto com baixo valor da coordenada  $a^*$  pode-se concluir que a espécie possui pouca quantidade de extrativo.

Barros e colaboradores (2014) realizando pesquisa sobre a caracterização colorimétrica de três espécies amazônicas, encontraram respectivamente para a madeira de breu-vermelho (*Protium puncticulatum* J.F. Macbr.), tauari-vermelho (*Cariniana micrantha* Ducke) e pequiariana (*Caryocar glabrum*), os seguintes valores para os parâmetros colorimétricos:  $L^*=55,72$ ;  $a^*=7,95$ ;  $b^*=15,11$ ;  $C=17,31$ ;  $h^*=60,50$  e classificação da cor Oliva ou Rosa acinzentado,  $L^*=63,04$ ;  $a^*=7,66$ ;  $b^*=18,43$ ;  $C=20,19$ ;  $h^*=65,54$  e classificação da cor Cinza-rosado e  $L^*=64,67$ ;  $a^*=7,58$ ;  $b^*=18,87$ ;  $C=20,57$ ;  $h^*=66,52$  e classificação da cor Cinza-rosado ou Rosa-acinzentado. Como foi possível notar, as três espécies apresentam a coloração das madeiras muito influenciada pela coordenada  $b^*$  (amarelo), mesmo resultado encontrado para todas as espécies deste estudo.

Teles (2014) realizando ensaios não destrutivos para avaliar o desempenho de madeiras amazônicas tratadas quimicamente, encontrou valores médios dos parâmetros colorimétricos na testemunha para as madeiras de Marupá (*Simarouba amara*)  $L^*=84,2$ ;  $a^*=2,8$ ;  $b^*=23,3$ ;  $C=23,4$ ;  $h^*=83,1$ ; Tauari (*Couratari* sp)  $L^*=72,6$ ;  $a^*=5,6$ ;  $b^*=25,4$ ;  $C=26,0$ ;  $h^*=77,6$ ; e Cumarú (*Dipteryx odorata*)  $L^*=54,5$ ;  $a^*=10,8$ ;  $b^*=24,3$ ;  $C=26,6$ ;  $h^*=66,1$ . Valores estes semelhantes aos encontrados deste trabalho.

De Paula (2016) estudando o efeito do tratamento térmico em propriedades tecnológicas das madeiras de angelim vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke) e sapucaia (*Lecythis pisonis* Cambess), encontrou os valores dos parâmetros colorimétricos do angelim vermelho  $L^*=50,75$ ;  $a^*=15,44$ ;  $b^*=22,99$ ;  $C=27,70$ ;  $h^*=56,10$ , sendo classificado sua cor como Marrom-avermelhado, valores muito próximos ao desta pesquisa ( $L^*=50,40$ ;  $a^*=16,06$ ;  $b^*=24,47$ ;  $C=29,29$ ;  $h^*=56,75$ ) classificado como Amarelo-amarronzado.

De Paula et al. (2016) utilizaram métodos não destrutivos para caracterização

simplificada da madeira de cumaru (*Dipteryx odorata* Willd) encontraram valores de  $L^*=50,87$ ;  $a^*=12,71$ ;  $b^*=24,66$ ;  $C=25,75$ ;  $h^*=62,75$ , com classificação da cor Amarela-amarronzada. Estes valores são análogos ao desta pesquisa ( $L^*=51,58$ ;  $a^*=12,10$ ;  $b^*23,31$ ;  $C=26,22$ ;  $h^*=62,42$ ).

Os valores registrados para os parâmetros colorimétricos das madeiras em estudo para as faces radial e tangencial são apresentados na Tabela 2.

ESPÉCIE		L*	a*	b*	C	h*
<i>Q. brevipedicellata</i>	RD	66,12a	10,28a	25,50a	27,53a	68,12a
	TG	63,94a	11,09a	25,41a	27,76a	66,51a
<i>G. glabra</i>	RD	59,03a	9,56a	28,01a	29,69a	71,21a
	TG	59,06a	9,00a	26,13b	27,67b	71,02a
<i>M. itauba</i>	RD	55,35a	8,42a	30,27a	31,45a	74,36a
	TG	48,72b	8,99a	24,11b	25,78b	69,50b
<i>E. uncinatum</i>	RD	56,03a	11,40a	22,48a	25,27a	63,24a
	TG	54,06a	12,40a	22,10a	25,42a	60,82a
<i>H. petraeum</i>	RD	63,71a	13,80a	26,68a	30,05a	62,70a
	TG	61,19b	13,88a	25,68a	29,22a	61,63a
<i>M. huberi</i>	RD	47,66a	15,19a	20,03a	25,16a	52,77b
	TG	47,23a	14,19b	19,67a	24,28a	54,23a
<i>A. leiocarpa</i>	RD	63,62a	11,49a	32,69a	34,68a	70,60a
	TG	60,22b	11,19a	29,24b	31,31b	69,05a
<i>D. odorata</i>	RD	52,41a	12,50a	24,69a	27,70a	63,03a
	TG	50,76a	11,69b	21,80b	24,75b	61,80a
<i>S. amara</i>	RD	81,81a	4,01a	24,12a	24,46a	80,56a
	TG	81,54a	4,22a	24,62a	24,99a	80,29a
<i>C. cateniformis</i>	RD	58,37a	10,84a	23,98a	26,37a	65,51a
	TG	57,54a	10,31a	22,63a	24,94a	65,44a
<i>T. altissima</i>	RD	54,42a	17,37a	28,11a	33,04a	58,29a
	TG	53,17a	16,51b	26,73b	31,42b	58,31a
<i>V. máxima</i>	RD	56,94a	18,14a	25,47a	31,28a	54,58a
	TG	57,61a	18,55a	25,93a	31,90a	54,46a
<i>D. purpurea</i>	RD	43,82b	10,16a	20,97b	23,32b	64,10b
	TG	47,39a	9,93a	22,73a	24,81a	66,41a
<i>E. pinnata</i>	RD	56,71a	15,19a	24,30a	28,66a	58,01a
	TG	55,57a	15,33a	24,10a	28,57a	57,57a
<i>L. cultratus</i>	RD	66,09a	4,53a	21,56a	22,06a	78,61a
	TG	64,36a	5,25a	22,07a	22,74a	77,10a

Médias seguidas pela mesma letra, dentro da mesma coluna para uma espécie, não diferem estatisticamente ao nível de 1% de significância pelo teste de Tukey.

Tabela 2 - Valores médios dos Parâmetros colorimétricos para as faces radial e tangencial das espécies em estudo.

Como é possível notar os valores médios da seção radial em todos os parâmetros colorimétricos foram superiores aos da seção tangencial, segundo Burger e Richter (1991), a face longitudinal radial é mais reluzente, devido ao efeito das faixas horizontais

dos raios. Nishino et al. (1998) afirmam que as diferenças de cor entre a faces radial e tangencial são atribuídas às características anatômicas e compostos químicos das madeiras tropicais.

Constata-se na Tabela 2 a diferença significativa entre as seções radial e tangencial das madeiras de *G. glabra* (Cupiúba), *M. itauba* (Itaúba), *H. petraeum* (Angelim-pedra), *M. huberi* (Maçaranduba), *A. leiocarpa* (Garapeira), *D. odorata* (Cumbarú), *T. altissima* (Muiracatiara), *D. purpurea* (Sucupira). Verifica-se que a reflectância obtida na região do visível na seção radial foi maior em relação à tangencial. As diferenças significativas entre as seções radial e tangencial, através dos parâmetros colorimétricos, configura que o sentido de desdobro pode interferir na cor da madeira, visto que a cor é estatisticamente diferente para os dois planos de observação (BARROS et al. 2014).

D Ambros (2011) em sua pesquisa avaliou os parâmetros colorimétricos de cinco espécies amazônicas, encontrando diferenças significativas entre as faces radial e tangencial. Os parâmetros colorimétricos que tiveram diferença estatística significativa foram  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , C e  $h^*$  para a espécie *Hymenolobium petraeum* – angelim-pedra,  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , C e  $h^*$  *Dinizia excelsa* - angelim-vermelho,  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  e C *Cedrela odorata* - cedro,  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , C e  $h^*$  *Ocotea sp* – louro e  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$  *Hymenaea Courbaril* – jatobá. Ressaltando ainda que os valores médios de todos os parâmetros foram superiores na face radial em relação a face tangencial, com exceção do da coordenada  $a^*$  onde a face tangencial obteve valores mais elevados. O mesmo resultado encontrado por Calderon (2012) para as espécies nativas da Amazônia *Aspidosperma macrocarpon* - amarelinho ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , C e  $h^*$ ), *Symphonia globulifera* – bacuri ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , C e  $h^*$ ), *Ocotea costulata* – louro-roxo ( $a^*$ ,  $b^*$ , C e  $h^*$ ), e *Brosimum paraense* – muirapiranga ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , C e  $h^*$ ). Este mesmo comportamento foi constatado nesta pesquisa.

Silva et al. (2015) analisaram a cor da madeira de oito espécies nativas do estado Rio Grande do Sul, sendo que para quatro espécies houve diferença estatística significativa entre as faces radial e tangencial através dos parâmetros colorimétricos, sendo elas, *Araucaria angustifolia* (araucária) parâmetro ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , C), *Ilex pseudobuxus* (caúna) parâmetro ( $L^*$ ), *Luehea divaricata* (açoita-cavalo) parâmetro ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , C) e *Myrocarpus frondosus* (cabreúva) parâmetro ( $b^*$ , C).

Diversos autores também constataram o mesmo comportamento entre as faces radiais e tangenciais em seus trabalhos. González et al. (2006) com as espécies *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus cloeziana*, Autran e González (2006) avaliando a espécie *Brosimum rubescens* (muirapiranga), Zerbini (2008) com *Sterculia pruriens* (axixá), *Pouteria oppositifolia* (guajará) e *Tachigali myrmecophila* (taxi preto).

As faces tangenciais e radiais das espécies *Q. brevipedicellata* (cambará), *E. uncinatum* (cedrinho), *S. amara* (marupá), *C. cateniformis* (cedrorana), *V. máxima* (cambará rosinha), *E. pinnata* (louro faia) e *L. cultratus* (embira de sapo) (Tabela 2) são estatisticamente iguais pelo teste de Tukey. Diante disso, o sentido de desdobro não interfere na coloração da madeira, pois a coloração amarela é estatisticamente igual para os sentidos tangencial e radial.

Autran e Gonzalez (2006) avaliando a espécie *Hevea brasiliensis* (seringueira) e Silva et al. (2015) estudando *Cabralea canjerana* (canjerana), *Cedrela fissilis* (cedro), *Balfourodendron riedelianum* (guatambu) e *Apuleia leiocarpa* (grapia) também não encontraram diferenças significativas entre as faces radial e tangencial das espécies.

#### 4 | CONCLUSÕES

A colorimetria quantitativa, como técnica para a determinação da cor e diferenciação das faces radial e tangencial da madeira, mostrou-se eficiente, simples e prática. Podendo ser utilizada na pré-classificação e agrupamento de madeiras de cores semelhantes para comercialização.

Cada espécie avaliada neste estudo apontou uma coloração específica por meio dos valores dos parâmetros colorimétricos, sendo possível a diferenciação e auxiliando na identificação das espécies.

O sentido do desdobra não interfere na coloração da madeira, sendo a coloração amarela definida pelo parâmetro \*b estatisticamente igual para os sentidos tangencial e radial das espécies *Q. brevipedicellata*, *E. uncinatum*, *S. amara*, *C. cateniformis*, *V. máxima*, *E. pinnata* e *L. cultratus*.

As espécies *G. glabra*, *M. itauba*, *H. petraeum*, *M. huberi*, *A. leiocarpa*, *D. odorata*, *T. altissima*, *D. purpúrea*, apresentaram diferença de cor entre as seções radial e tangencial, com maior valor no plano radial, sendo influenciados pela coloração amarela, definida no parâmetro \*b.

#### 5 | AGRADECIMENTO

Ao Instituto Federal de Mato Grosso (IFMT), por intermédio da Pró-Reitoria de Pesquisa e Inovação (PROPES) e Diretoria de Pesquisa e Inovação (DPI) pelo apoio financeiro concedido ao projeto de pesquisa. A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso (FAPEMAT) pela concessão da bolsa de iniciação científica à discente Amanda Rodrigues.

#### REFERÊNCIAS

AMORIM, P.G.R., GONÇALEZ, J.C., CAMARGOS, J.A.A. Propriedades da madeira de *Pinus caribaea* e *Eucalyptus grandis* estimadas por colorimetria. **Revista Cerne**, Lavras, v. 19, n. 3, p. 461-466, jul./ set. 2013.

AUTRAN, C.S., GONÇALEZ, J.C. Caracterização colorimétrica das madeiras de muirapiranga (*Brosimum rubescens* Taub.) e de seringueira (*Hevea brasiliensis*, clone Tjir 16 Müll Arg.) visando à utilização em interiores. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 4, 445-451. 2006.

BARROS, S.V.S., MUÑIZ, G.I.B., MATOS, J.L.M. Caracterização colorimétrica das madeiras de três espécies florestais da Amazônia. **Revista Cerne**, v. 20, n. 3, 337- 342. 2014.

BURGER, L.M., RICHTER, H.G. **Anatomia da madeira**. Livraria Nobel S.A. 154p. 1991.

CAMARGOS, J.A.A., GONÇALEZ, J.C. A colorimetria aplicada como instrumento na elaboração de uma tabela de cores de madeira. **Brasil Florestal**, Brasília, n. 71. 30-41. 2001.

CALDERON, C.M.A. **O segmento moveleiro na região do Alto Juruá – AC: Perfil e uso de tecnologias alternativas para a caracterização das principais espécies madeireiras**. Tese de Doutorado em Ciências Florestais, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, 174p. 2012.

CIPEM - Centro das indústrias produtoras e exportadoras de madeiras do estado de Mato Grosso. Dados do Setor: volume transportado por GF3 m<sup>3</sup>. 2019. Fonte: SEMA. Disponível em: <<https://www.cipem.org.br/dados-do-setor/>> Acesso em: 14 jan. 2019.

COMISSION PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS – COPANT. Maderas: selección y colección de muestras. COPANT, Caracas-Venezuela, **COPANT - 458**. 1972.

D'AMBROS, J. **Cadeia produtiva moveleira da região central do Estado do Tocantins: caracterização e perspectivas para a formação de polo moveleiro**. Tese de doutorado em Ciências Florestais, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília-UnB, 301p. 2011.

DE PAULA, M.H. **Efeito do tratamento térmico em propriedades tecnológicas das madeiras de angelim vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke) e sapucaia (*Lecythis pisonis* Cambess)**. Dissertação de mestrado em Ciências Florestais, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, 103p. 2016.

DE PAULA, M.H., MESQUITA, R.R.S., GONÇALEZ, J.C., RIBEIRO, E.S., SOUZA, R.S. Utilização de métodos não destrutivos para caracterização simplificada da madeira de cumaru (*Dipteryx odorata* Willd). **Revista Biodiversidade**, V.15, N2, 136- 149. 2016.

FARIAS, S.M.A.P. **Caracterização de espécies madeireiras como alternativas às tradicionalmente exploradas e utilizadas industrialmente na regional Tarauacá Envira - Estado do Acre**. Dissertação de mestrado em Engenharia Florestal. Universidade Federal do Paraná – UFPR. 137p. 2015.

GONÇALEZ, J.C. **Caracterisation technologique de quatre espèces peu connues da la forêt Amazonienne: anatomie, chimie, couleur, propriétés physiques et mécaniques**. Thèse Doctorat – Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, Nancy, 446p. 1993.

GONÇALEZ, J.C., BRENDA, L.C.S., BARROS, J.F.M., MACEDO, D.G., JANIN, G., COSTA, A.F., VALE, A.T. Características tecnológicas das madeiras de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Madein e *Eucalyptus cloeziana* F. Muell visando ao seu aproveitamento na indústria moveleira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 3, 329-341. 2006.

GONÇALEZ, J.C., FÉLIX, T.L.F., GOUVEIA, F.N., CAMARGOS, J.A.A., RIBEIRO, P.G. Efeito da radiação ultravioleta na cor da madeira de freijó (*Cordia goeldiana* Huber) após receber produtos de acabamentos. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 20, n. 4, 657-664. 2010.

GONÇALEZ, J.C., JANIN, G., SANTORO, A.C.S., COSTA, A.F. DA, VALE, A.T. Colorimetria quantitativa: uma técnica objetiva de determinar a cor da madeira. **Brasil Florestal**, n. 72, 47-58. 2001.

MARTINS, S.A., SANTOS, C.M.T., GONÇALEZ, J.C., CAMARGOS, J.A.A. Envelhecimento artificial acelerado por radiação ultravioleta de madeiras de *Eucalyptus benthamii* E *Pinus caribaea* var. hondurensis. **Revista Floresta**, Curitiba, PR, v. 41, n. 1, p. 87-96, jan./mar. 2011.

MESQUITA, R.R., GONÇALEZ, J.C., DE PAULA, M.H. Comportamento da madeira de *Tectona grandis* frente ao intemperismo. **Revista Floresta**, Curitiba, PR, v. 47, n. 1, p. 29 - 35, jan. / mar. 2017.

MORI, C.L.S.O.; LIMA, J.T.; MORI, F.A.; TRUGILHO, P.F.; GONÇALEZ, J.C. Caracterização da cor da madeira de clones de híbridos de *Eucalyptus* spp. **Revista Cerne**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 137-146, 2005.

MOYA, R.; MARIN, J. D. Grouping of *Tectona grandis* (L.f.) clones using wood color and stiffness. **New Forests**, Dordrecht, v. 42, p. 329-345, 2011.

NISHINO, Y., JANIN, G., CHANSON, B., DÉTIENNE, P., GRIL, J., THIBAUT, B. Colorimetry of wood specimens from French Guiana. **Journal of Wood Science**, London, v. 44, 3-8. 1998.

RIBEIRO, E.S. **Comercialização de madeira serrada de florestas naturais em Mato Grosso: Um diagnóstico do setor de base florestal**. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais, Universidade Federal de Mato Grosso, Departamento de Engenharia Florestal, FENF/UFMT. 116pag. 2013.

SILVA, E.S., STANGERLIN, D.M., GATTO, D.A., CALEGARI, L., PARIZ, E. Colorimetria da madeira de oito espécies nativas do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Ciência da Madeira** (Brazilian Journal of Wood Science), 6(1): 31-37. 2015.

SILVA, F.A.Z., AZEVEDO, C.A.V. Versão do programa computacional ASSISTAT para o sistema operacional Windows. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.4, n.1, 71-78. 2002.

SILVA, J.O., PASTORE, T.C.M., PASTORE JÚNIOR, F. Resistência ao intemperismo artificial de cinco madeiras tropicais e de dois produtos de acabamento. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 17, n. 1, 17-23. 2007.

STANGERLIN, D.M. **Monitoramento de propriedades de madeiras da Amazônia submetidas ao ataque de fungos apodrecedores**. Tese de doutorado em Ciências Florestais, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. 259p. 2012.

TELES, R.F. **Ensaio não destrutivo para avaliar o desempenho de madeiras Amazônicas tratadas quimicamente**. Tese de Doutorado em Ciências Florestais, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, 195p. 2014.

ZERBINI, N.J. **Madeiras tropicais com potencial comercial da região do rio Xingu (Pará, Brasil): Propriedades tecnológicas e cadeia produtiva**. Tese de doutorado em Ciências Florestais, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 212p. 2008.

## COMPORTAMENTO DA ALFACE COM DISTINTAS DOSAGENS DE ESTERCO CAPRINO EM DIFERENTES REGIÕES

### **Thaís Rayane Gomes da Silva**

Universidade Federal de Alagoas – UFAL  
(Campus de Arapiraca)  
Arapiraca – AL

### **Marcelo Rodrigues Barbosa Júnior**

Universidade Federal de Alagoas – UFAL  
(Campus de Arapiraca)  
Arapiraca – AL

### **Cinara Bernardo da Silva**

Universidade Federal de Alagoas – UFAL  
(Campus de Arapiraca)  
Arapiraca – AL

### **Luan Wamberg dos Santos**

Universidade Federal do Vale do São Francisco –  
UNIVASF  
Juazeiro, Bahia

### **Márcio Aurélio Lins dos Santos**

Universidade Federal de Alagoas – UFAL  
Doutor em Irrigação e drenagem ESALQ/USP

Anadia, AL (experimento 2). O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados (DBC), com cinco repetições, cada nível de adubação possuía uma dosagem diferente: (50% com 24,50 g; 75% com 36,75 g; 100% com 49,00 g; 125% com 61,25 g e 150% com 73,50 g). As variáveis analisadas após trinta dias do plantio das mudas foram: diâmetro da planta (DP), número de folhas (NF), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa seca da parte aérea (MSPA) e área foliar (AF). Os dados foram submetidos à análise de variância. Das variáveis analisadas, no experimento 1 apenas massa fresca da parte aérea (MFPA) foi significativa, apresentando melhor resultado com a dosagem de 61,25 g. Já no experimento 2, todas as variáveis analisadas apresentaram efeito significativo, obtendo melhor resultado com a dosagem de 73,50 g de esterco caprino. **PALAVRAS-CHAVE:** *Lactuca sativa*, DBC, variáveis.

**RESUMO:** A alface (*Lactuca sativa* L.) é uma das hortaliças folhosas de maior importância comercial e consumo em todo o mundo. O presente projeto de pesquisa teve como objetivo avaliar a produção da alface com diferentes dosagens de esterco caprino em diferentes regiões, os experimentos foram conduzidos em ambiente aberto na Universidade Federal de Alagoas (UFAL) – *Campus* de Arapiraca (experimento 1) e na cidade de Limoeiro de

**ABSTRACT:** Lettuce (*Lactuca sativa* L.) is one of the bush vegetables of major commercial importance and consumption throughout the world. The present research project had the objective of evaluating lettuce production with different doses of goat manure in different regions, the experiments were conducted in an open environment at the Federal University of Alagoas (UFAL) - *Campus* Arapiraca (experiment

1) and in the city of Limoeiro of Anadia, AL (experiment 2). The experimental design used was randomized blocks (DBC), with five replicates, each level of fertilization had a different dosage: (50% with 24.50 g, 75% with 36.75 g, 100% with 49.00 g; 125% with 61.25 g and 150% with 73.50 g). The variables analyzed after 30 days of planting were: plant diameter (DP), number of leaves (NF), fresh shoot mass (MFPA), dry shoot mass (MSPA) and leaf area (AF). Data were submitted to analysis of variance. From the analyzed variables, in experiment 1 only fresh shoot mass (MFPA) was significant, presenting a better result with the dosage of 61.25 g. In the experiment 2, all variables analyzed had a significant effect, obtaining a better result with the dosage of 73.50 g of goat manure.

**KEYWORDS:** *Lactuca sativa*, DBC, variables.

## 1 | INTRODUÇÃO

A alface (*Lactuca sativa*) pertencente à família Asteraceae é a hortaliça mais difundida atualmente, sendo cultivada em quase todos os países. Originária da região do mediterrâneo é a hortaliça folhosa mais importante no mundo sendo consumida principalmente in natura na forma de salada (SALA, 2012).

Seu cultivo é feito de maneira intensiva e geralmente praticado pela agricultura familiar, responsável pela geração de cinco empregos diretos por hectare (ALENCAR, 2012). Um dos maiores desafios para a agricultura na atualidade é de desenvolver sistemas agrícolas sustentáveis que possam produzir alimentos e fibras em quantidades e qualidades suficientes, sem afetar os recursos do solo e do ambiente (SOUSA, 2014).

Para a cultura da alface, os produtores utilizam excessivamente os fertilizantes minerais, podendo a adubação orgânica ser um diferencial para redução dessa prática (SANTI, 2010). Segundo Silva (2011), a adubação orgânica não só incrementa a produtividade mas também produz plantas com características qualitativas melhores que as cultivadas exclusivamente com adubos minerais podendo, portanto, exercer influência sobre a qualidade nutricional da alface.

O solo ideal para o cultivo dessa hortaliça é o de textura média, rico em matéria orgânica e com boa disponibilidade de nutrientes. Para se obter maior produtividade, é necessário o uso de insumos que melhorem as condições físicas, químicas e biológicas do solo. (SOUZA, 2005).

O esterco de cabra conceitua-se como um dos adubos mais ativos e concentrados, (ALVES, 2008) em experimentos observou que 250 kg de esterco de cabra, incorporados ao solo, produzem o mesmo efeito que 500 kg de esterco de vaca.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a produção da alface com diferentes dosagens de esterco caprino em diferentes regiões foram analisadas as seguintes variáveis: número de folhas (NF), diâmetro da cabeça (DC), área foliar (AF), massa fresca da parte aérea (MFPA) e massa seca da parte aérea (MSPA) da alface (*Lactuca sativa*) cultivar Crespa.

## 2 | MATERIAL E MÉTODOS

Foram conduzidos dois experimentos sob ambiente aberto, na Universidade Federal de Alagoas (UFAL) – Campus Arapiraca (experimento 1), no período de abril a junho de 2015 e na cidade de Limoeiro de Anadia, AL (experimento 2), no período de junho a julho de 2015.

No experimento 1, a região possui clima quente temperado, situada entre a zona da mata e o sertão alagoano, possuindo solo classificado como – Latossolos vermelho amarelo distrófico e apresentando Ph do solo de 5,6. E no experimento 2, a região possui clima do tipo Subúmido Seco, situada entre Mesorregião do Agreste Alagoano e na Microrregião de Arapiraca, possuindo solo classificado como – Latossolo amarelo distrófico.

Em ambos os experimentos o delineamento experimental foi em blocos casualizados (DBC) com parcelas subdivididas em 5 blocos e 5 parcelas. As parcelas foram constituídas por sacolas de 0,25m de diâmetro, correspondente a 1 planta, com espaçamento de 0,30 x 0,30m entre linhas e plantas. As 25 plantas formaram o total de parcelas experimental que constituíram a área útil.

Foi utilizada a cultivar Crespa, na qual foram testadas diferentes níveis de adubo orgânico, sendo constituídos por 5 quantidades de esterco caprino. Informações do Instituto Agrônomo de Campinas (SP), fevereiro de 2013, apontam que a quantidade de esterco caprino utilizado no cultivo da alface equivale a 1 kg de esterco caprino/m<sup>2</sup> de acordo com esses dados, obtém-se a quantidade de esterco por parcela equivale a: P1 (24,50g), P2 (36,75g), P3 (49,00g), P4 (61,25g) e P5 (73,50g), onde P3 representa a dosagem correta da adubação.

A lâmina de irrigação escolhida para o experimento foi de 500 ml de água para cada planta, sendo aplicada diariamente uma vez ao dia, entre os horários de 07h30min a 08h00min da manhã. Foi realizado o preparo do experimento da seguinte forma: medição e demarcação da área experimental, em seguida houve o preparo das sacolas, onde foram retirados 10 cm de sua altura, deixando-a com 25 cm, em seguida as sacolas foram devidamente preenchidas com solo e incorporado o adubo orgânico.

As mudas foram adquiridas com o produtor da cidade de Arapiraca, estando com 30 dias após a semeadura (DAS), onde as plantas apresentavam de 3 a 4 folhas. No experimento 1, as mudas foram transplantadas no dia 22 de abril de 2015, e no experimento 2, foram transplantadas no dia 10 de junho de 2015.

A fiscalização do projeto foi feita periodicamente, na qual se realizou o controle manual de plantas invasoras. Foram realizadas cinco biometrias semanalmente para determinar as seguintes variáveis: número de folhas (NF), diâmetro da planta (DP). Após a colheita, foi medida a massa fresca da parte aérea (MFPA) e massa seca da parte aérea (MSPA).

Os dados foram submetidos à análise de variância. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade utilizando o programa estatístico R.

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com os dados obtidos houve resultado significativo para efeito do adubo utilizado nas variáveis analisadas.

#### Experimento 1.

Verificou-se efeito significativo apenas para massa fresca da parte aérea (MFPA), expresso na Tabela 1.

Causa de Variação	GL	QM			
		NF	DP	MFPA	MSPA
Tratamento	4	25,10 <sup>ns</sup>	34,764 <sup>ns</sup>	1837,18*	73,621 <sup>ns</sup>
Blocos	4	0,80 <sup>ns</sup>	6,201 <sup>ns</sup>	503,50 <sup>ns</sup>	27,902 <sup>ns</sup>
Erro	16	10,15	15,382	524,17	30,354
C.V. (%)		24,51	15,74	51,33	84,13

\* significativo pelo teste “F” a 5% de significância

<sup>ns</sup> não significativo

TABELA 1. Resultados das variáveis: número de folhas (NF), diâmetro da planta (DP), massa fresca da parte aérea (MFPA)g e massa seca da parte aérea (MSPA)g da cultura da alface cv. Crespa em função de dosagens de esterco caprino.

Levando em conta os resultados obtidos no experimento pode-se afirmar que a parcela com maior desempenho foi à dosagem de esterco caprino de 125% onde obteve uma melhor média, avaliadas de acordo com o programa estatístico Sisvar (Tabela 2).

(P1)50%	10	23,09	22,82	2,67
(P2)75%	12	22,7	32,83	3,64
(P3)100%	12	23,4	40,14	5,89
(P4)125%	16	28,63	71,16	12,17
(P5)150%	14	26,78	56,06	8,38

TABELA 2. Média das parcelas

Para a variável massa fresca da parte aérea (MFPA) os resultados estão de acordo com Gualberto et al. (2009) que também verificaram em seus experimentos que a cultivar alface Crespa destacou-se apresentando uma das maiores massas frescas da parte aérea, classificando-a ainda como a de maior adaptabilidade geral nos ambientes de cultivo.

Observou-se através da análise de regressão que houve um acréscimo da produção de acordo com as diferentes dosagens de esterco caprino, sendo a maior produção na P<sub>4</sub> (125%); esses resultados são expressos na (Figura 1).

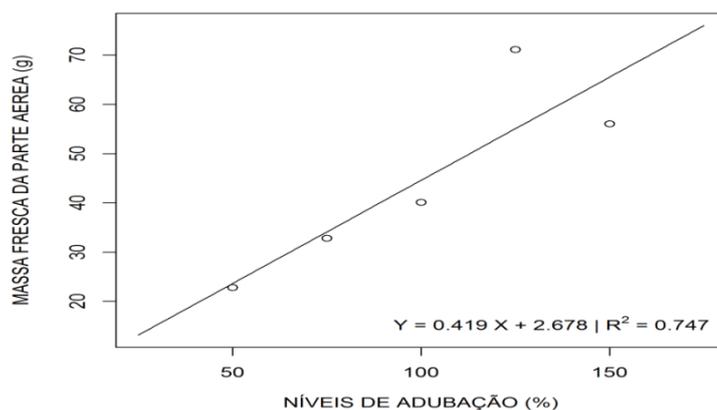


FIGURA 1. Resposta da cultura da alface cv Crespa para a variável: massa fresca da parte aérea (MFPA).

Para a variável massa fresca da parte aérea (MFPA) o resultado obteve um aumento constante de 0,419% de acordo com cada parcela de esterco caprino. Contudo, os níveis de adubação não foram suficientes para as demais variáveis analisadas.

### Experimento 2.

Verificou-se efeito significativo das parcelas de adubo para número de folhas (NF), diâmetro da planta (DP), área foliar (AF), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa seca parte aérea (MSPA).

Causa de Variação	GL	QM				
		NF	DP	AF	MFPA	MSPA
<b>Adubo</b>	4	6.04**	11.71*	112582*	481.27**	2.50*
<b>Blocos</b>	4	4.84	4.05	37818	148.65	0.75
<b>Erro</b>	16	1.26	3.39	32402	69.39	0.59
<b>C.V. (%)</b>		8.25	6.41	16.9	15.2	16.12

\* significativo pelo teste “F” a 5% de significância

\*\* significativo pelo teste “F” a 1% de significância

TABELA 3. Resultados das variáveis: número de folhas (NF), diâmetro da planta (DP), área foliar (AF) cm<sup>2</sup>, massa fresca da parte aérea (MFPA)g e massa seca da parte aérea (MSPA)g da cultura da alface cv. Crespa em função de dosagens de esterco caprino.

Levando em conta os resultados obtidos nos experimentos pode-se afirmar que o experimento 2 obteve como melhor parcela a dosagem de esterco caprino referente a 150%, avaliadas de acordo com o programa estatístico R (Tabela 4).

<b>(P1)50%</b>	13	27,10	962,300	46,43	3,97
<b>(P2)75%</b>	13	27,30	863,740	43,16	3,59
<b>(P3)100%</b>	14	29,40	1162,756	59,12	4,90
<b>(P4)125%</b>	15	29,32	1105,920	58,28	4,85
<b>(P5)150%</b>	14	30,70	1231,680	66,99	5,28

TABELA 4. Média das parcelas

Observou-se através da análise de variância realizada no experimento 2 (Tabela 4), que houve efeito significativo para níveis de adubação caprina, sendo que para variável número de folhas (NF) a  $P_4$  (125%) obteve média de 15 folhas por plantas amostradas, melhor rendimento. O maior número de folhas por planta foi observado em valores semelhantes, o que reforça a importância dessa variável no incremento de plantas adubadas com esterco caprino (SILVA, 2011).

Para o diâmetro da planta (DP) a variável P5 150% obteve a maior média de 30,70 cm. Foram constatadas diferenças estatísticas entre as variáveis analisadas, sendo que as plantas apresentaram diâmetro médio de 35,50 cm, em Resende (2007).

Foi analisado efeito significativo para a área foliar (AF) onde a P5 (150%) está referente a 1.231,680 cm<sup>2</sup>. Resultados que se mostra inferior ao encontrado por Silva (2011), onde o maior valor de área foliar foi de 4.673,91 cm<sup>2</sup> por planta na concentração de 89,06% de nutrientes na solução nutritiva de esterco caprino.

Para a variável massa fresca da parte aérea (MFPA) a P5 (150%) obteve resultado de 66,99g por plantas amostradas. Os valores médios comuns da massa fresca das plantas, em gramas, são praticamente iguais em Morais (2007).

Para a variável massa seca da parte aérea (MSPA) o melhor resultado encontra-se na P5 (150%) com 5,28g por plantas amostradas. Esses resultados demonstram que o esterco caprino proporcionou maior eficiência no crescimento e acúmulo de massa seca na cultura da alface Silva (2011).

Observou-se através da análise de regressão que houve um acréscimo da produção para cada variável analisada (número de folhas, diâmetro da planta, área foliar, massa fresca da parte aérea e massa seca da parte aérea) de acordo com as diferentes dosagens de esterco caprino, sendo a maior produção na  $P_5$  (150%); esses resultados são expressos na (Figura 2).

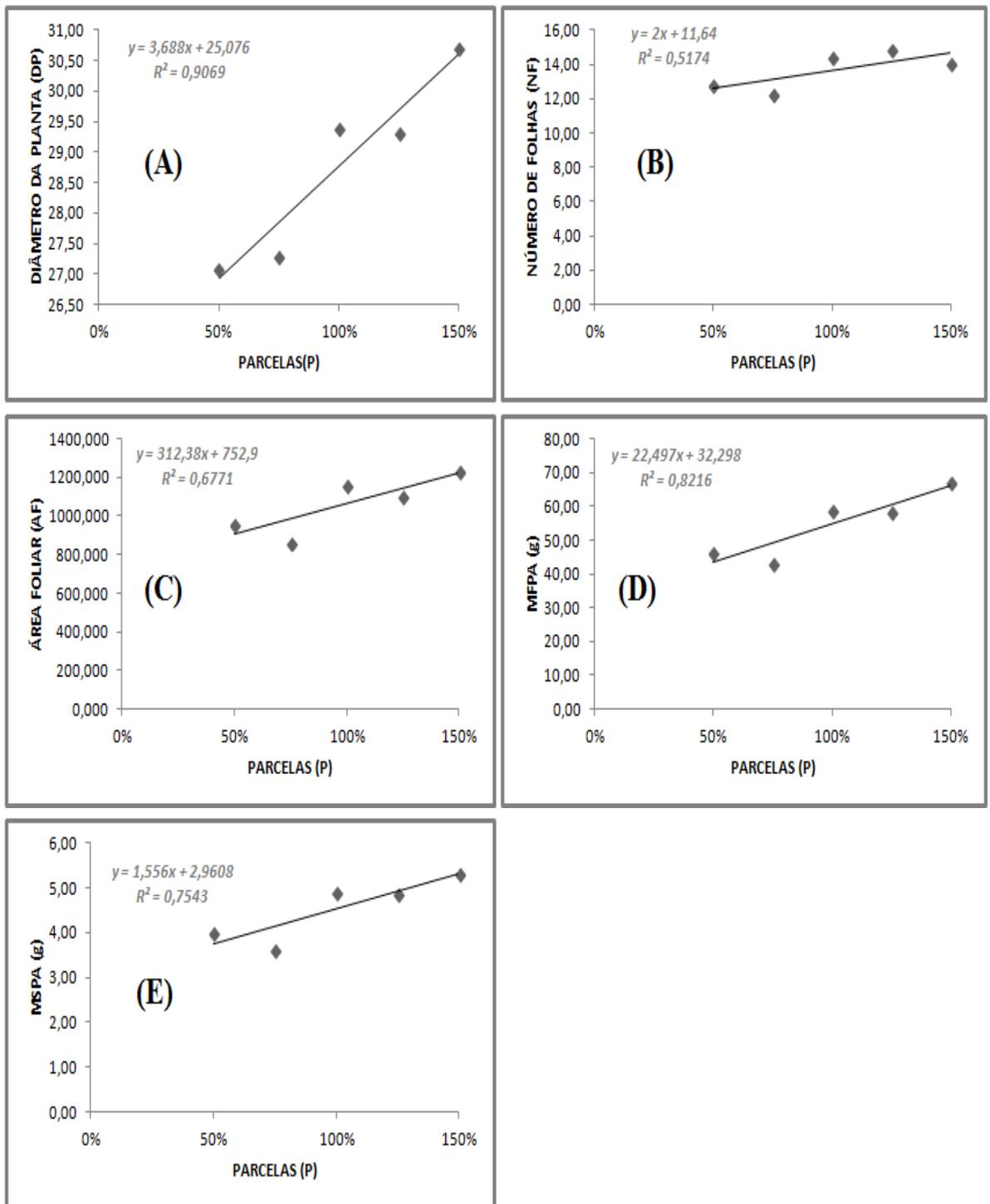


FIGURA 2. Resposta da cultura da alface cv Crespa para as variáveis: diâmetro da planta (DP), número de folhas (NF), área foliar (AF), massa fresca da parte aérea (MFPA) e massa seca da parte aérea (MSPA). (Experimento 2).

Para a variável diâmetro da planta (DP) teve um aumento constante de 3,69%. A variável número de folhas (NF) cada unidade de número de folhas obteve um aumento constante de 2%.

Para a área foliar (AF) o aumento constante dessa variável foi de 312,38%. A variável massa fresca da parte aérea (MFPA) obteve um aumento constante de 22,50% e a variável massa seca da parte aérea (MSPA) seu aumento constante foi de 1,56% na produção de acordo com cada parcela de esterco caprino.

## 4 | CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos, no experimento 1 houve interação significativa entre as parcelas de esterco caprino e a variável massa fresca da parte aérea, sendo que a P4 (125%) foi a que apresentou um melhor resultado no experimento.

Em relação ao experimento 2, todas as variáveis analisadas foram significativas, sendo que a P5 (150%) foi a que proporcionou o melhor desempenho a cultura da alface cv. Crespa.

## REFERÊNCIAS

ALENCAR, T. A.; TAVARES, A. T.; CHAVES, P. P. N.; FERREIRA, T. A.; NASCIMENTO, I. R. **Efeito de intervalos de aplicação de urina bovina na produção de alface em cultivo protegido**. Revista Verde. Mossoró, v.7, n.3, p. 53-67, 2012.

ALVES, F.S.F.; PINHEIRO, R. R. **O esterco caprino e ovino como fonte de renda**. Embrapa, 2008.

GUALBERTO R; OLIVEIRA PSR; GUIMARÃES AM. 2009. Adaptabilidade e estabilidade fenotípica de cultivares de alface do grupo crespa, em cultivo hidropônico. Horticultura Brasileira 27: 7-11.

MORAIS, R. S. **Cultivo hidropônico das cultivares do Grupo Americana, Grandes Lagos e Rafaela no período de verão**. UESB, Itapetinga –BA. 2007.

RESENDE, G. A. **Desempenho de cultivares de alface na região Campo das Vertentes de Minas Gerais**, EPAMIG, São João del-Rei, MG, 2007.

SALA, F. C.; COSTA, C. P. **Retrospectiva e tendência da alfacultura brasileira**. Horticultura Brasileira. Brasília, DF, v. 30, p. 187-194, 2012.

SANTI, A; CARVALHO, M.A.C.; CAMPOS, O.R.; SILVA, A.F.; ALMEIDA, J.L.; MONTEIRO, S. **Ação de material orgânico sobre a produção e características comerciais de cultivares de alface**. Horticultura Brasileira v.28, p.87-90, 2010.

SILVA, E. M. N. C. P.; FERREIRA, R. L. F.; ARAÚJO NETO S. E.; TAVELLA, L. B.; SOLINO, A. J. S. **Qualidade de alface crespa cultivada em sistema orgânico, convencional e hidropônico**. Horticultura Brasileira, v.29, p.242-245, 2011.

SOUSA, T. P.; **Produção de alface em função de diferentes concentrações e tipos de biofertilizantes**. Revista Verde. Pombal, PB, v. 9 , n. 4, p. 168 - 172, 2014.

SOUZA, P.A.; NEGREIROS, M.Z.; MENEZES, J.B.; BEZERRA NETO, F.; SOUZA, G.L.F.M.; CARNEIRO, C.R; QUEIROGA, R.C.F. **Características químicas de alface cultivada sob efeito residual da adubação com composto orgânico**. Horticultura Brasileira, Brasília, v. 23, n.3, p. 754-757, jul set.2005.

## COMPORTAMENTO DA ALTURA DO CACAUEIRO SOB DIFERENTES QUANTIDADES DE ÁGUA E NITROGÊNIO

**Roger Luiz Da Silva Almeida**

Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia /  
UESB- Itapetinga (BA)

**Roger Luiz Da Silva Almeida Filho**

Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia /  
UESB-Vitoria da Conquista (BA)

**Gustavo Victor De Melo Araújo Almeida**

Universidade Estadual de Santa Cruz / UESC-  
Itabuna (BA)

**RESUMO:** O cacauzeiro (*Theobroma cacao* L.), da família Esterculiaceae, componente de população panmíticas, autóctone da região amazônica é uma planta perene de grande importância econômica. Este trabalho teve como objetivo verificar o comportamento da altura do cacauzeiro quando se aplica diferentes combinações de água e adubo. Os procedimentos experimentais foram conduzidos na Fazenda Vale do Sol no município de Jequié-Bahia. Para o manejo da irrigação se utilizou de 4 níveis de água e 4 doses de nitrogênio, o delineamento estatístico experimental foi um fatorial 4 x 4. Os diferentes níveis de água aplicados afetaram significativamente a altura das plantas, com probabilidade ( $0,01 < p < 0,05$ ) bem como um aumento nos níveis de nitrogênio levou a um aumento significativo ( $p < 0,01$ ) na altura das plantas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Comportamento,

cacauzeiro, irrigado.

### BEHAVIOR OF THE COCOA HEIGHT UNDER DIFFERENT QUANTITIES OF WATER AND NITROGEN

**ABSTRACT:** The cacao tree (*Theobroma cacao* L.), from the Esterculiaceae family, a component of the panmitic population, native to the Amazon region is a perennial plant of great economic importance. This work aimed to verify the behavior of cacao height when applying different combinations of water and fertilizer. The experimental procedures were conducted at Fazenda Vale do Sol in the municipality of Jequié-Bahia. For the irrigation management, 4 water levels and 4 nitrogen doses were used, the experimental statistical design was a 4 x 4 factorial. The different water levels applied significantly affected the height of the plants, with probability ( $0,01 < p < 0,05$ ) as well as an increase in nitrogen levels led to a significant increase ( $p < 0,01$ ) in plant height.

**KEYWORDS:** Behavior, cacao, irrigated.

### 1 | INTRODUÇÃO

As principais espécies brasileiras do cacauzeiro são o “forasteiro” ou cacau roxo, *Treobroma leiocarpum*, Bern, e o “criolo”,

*Treobroma cacao*, Linnaeus, sendo esta última, da família *Sterculiaceae*, originária do continente Sul Americano, atingindo entre 4 a 12 metros de altura (Oetterer et al., 2006). Os estudos da altura da planta e do diâmetro do caule durante o desenvolvimento do cacau podem fornecer dados que permitam prever analisar o vigor físico das plantas de cacau contribuindo assim para que se tenha uma perspectiva da produção. Segundo Santos et al. (2008), análise de variância é um processo aritmético de decomposição da soma de quadrados totais das observações em componentes associadas a causas reconhecidas de variações e independentes, e uma porção residual desconhecida, de natureza aleatória. Na prática experimental a análise de variância é um procedimento utilizado para comparar tratamentos. Este trabalho teve como objetivo avaliar o crescimento do cacau CCN-51 em função de níveis de água e doses de nitrogênio em seis oportunidades, através da análise de variância dos dados coletados.

## 2 | MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada na fazenda Vale do Sol no período de 10/12/2009 até 10/06/2012, em Jequié, Bahia (13° 51' 28" S, 40° 5' 2" W e altitude de 199 metros). A Classificação climática de Köppen indica que a área da pesquisa estar sob domínio do clima Bw, precipitação anual inferior a 500 mm com chuvas de verão. Foi realizado o plantio da cultura do cacau clonal CCN-51 em covas de 0,40x0,40x0,40 m no espaçamento de 3,5x2,0 m. Foram aplicadas quatro lâminas de irrigação tomando-se como base a lâmina bruta de irrigação (LB) sendo estas 0,60 LB, 0,80 LB, 1 LB e 1,2 LB, sendo as lâminas brutas inferidas de leituras de evaporação de água num tanque Classe "A" instalado na propriedade rural. As doses de fertilizantes aplicadas foram 70, 100, 130 e 160 % do nitrogênio (N) recomendado para a cultura do cacau. O delineamento estatístico experimental foi um factorial 4 x 4, em blocos casualizados com 4 repetições, onde os fatores lâminas de água (L) e doses de nitrogênio (N) foram combinados resultando em 16 tratamentos, foram realizadas durante o período experimental 6 avaliações da altura da planta do cacau com a utilização de uma trena de 10 m.

## 3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os níveis de água (L) aplicados neste estudo afetou significativamente a altura das plantas, com probabilidade ( $0,01 < p < 0,05$ ) apenas na avaliação 6, nas demais avaliações realizadas estes níveis não mostraram influência sob esta característica de crescimento, conforme a (Tabela 1). Segundo Braudeau (1970), o cacau é suscetível ao estresse causado pela falta de umidade no solo mas que a aplicação de muita água no solo afeta o seu desenvolvimento. Um aumento nos níveis de nitrogênio (N), levou a um aumento significativo ( $p < 0,01$ ) nas alturas das plantas de acordo a (Tabelas 1).

Fonte de Variação	GL	Quadrado Médio					
		AP1	AP2	AP3	AP4	AP5	AP6
Bloco	3	16,88 <sup>ns</sup>	33,83 <sup>ns</sup>	56,89 <sup>ns</sup>	21,61 <sup>ns</sup>	55,20 <sup>ns</sup>	87,10 <sup>ns</sup>
L	3	48,27 <sup>ns</sup>	91,38 <sup>ns</sup>	139,17 <sup>ns</sup>	218,30 <sup>ns</sup>	214,85 <sup>ns</sup>	312,24*
N	3	321,24*	319,88**	433,70**	558,16**	719,56**	980,57**
LxN	9	27,05 <sup>ns</sup>	43,81 <sup>ns</sup>	73,62 <sup>ns</sup>	142,13 <sup>ns</sup>	131,78 <sup>ns</sup>	139,66 <sup>ns</sup>
Resíduo	45	30,43	40,32	52,91	84,60	91,19	79,74
CV (%)		7,01	6,96	6,38	6,92	6,21	5,5
Lâminas (L)							
Regressão Linear	1	35,53 <sup>ns</sup>	62,38**	80,25*	111,66*	127,20*	211,79**
Regressão Quadrática	1	0,55 <sup>ns</sup>	3,73 <sup>ns</sup>	21,00 <sup>ns</sup>	12,82 <sup>ns</sup>	28,56 <sup>ns</sup>	20,63 <sup>ns</sup>
Regressão Cúbica	1	0,11 <sup>ns</sup>	2,41 <sup>ns</sup>	3,12 <sup>ns</sup>	39,25 <sup>ns</sup>	5,38 <sup>ns</sup>	6,26 <sup>ns</sup>
Níveis Nitrogênio(N)							
Regressão Linear	1	91,16*	33,18 <sup>ns</sup>	28,55 <sup>ns</sup>	18,94 <sup>ns</sup>	172,58 <sup>ns</sup>	358,07*
Regressão Quadrática	1	118,61*	187,78**	255,33*	372,45*	362,98*	372,17**
Regressão Cúbica	1	31,17 <sup>ns</sup>	18,95 <sup>ns</sup>	41,39 <sup>ns</sup>	27,24 <sup>ns</sup>	4,11 <sup>ns</sup>	5,19 <sup>ns</sup>
Lâminas (L) em mm							
Médias							
L <sub>1</sub> (1384,52)		80,44	93,56	115,72	134,80	156,00	165,84
L <sub>2</sub> (1653,22)		79,63	92,07	116,80	137,03	157,19	166,00
L <sub>3</sub> (1922,52)		78,07	91,34	113,61	130,47	153,11	161,07
L <sub>4</sub> (2193,91)		76,52	87,92	111,06	129,11	148,95	156,66
Níveis de Nitrogênio (N) em kg.ha <sup>-1</sup>							
Médias							
N <sub>1</sub> (318,30)		78,80	93,20	116,98	136,80	154,40	160,62
N <sub>2</sub> (405,80)		73,00	85,69	107,31	125,79	146,90	156,22
N <sub>3</sub> (493,10)		78,88	89,90	112,82	130,27	151,20	158,93
N <sub>4</sub> (580,60)		83,96	96,09	119,13	138,55	162,76	173,82

Ns; \* ; \*\*; não significância e significância aos níveis de 5% (0.01 < p < 0.05) e 1% (p < 0.01) de probabilidade, respectivamente.

**Tabela 1.** Resumo da análise de variância e regressão da variável altura de planta (AP) em (cm) em 6 avaliações, submetidas às lâminas de água e doses de nitrogênio.

Os resultados da interação entre L e N não afetaram significativamente a característica analisada (Tabela 1). Souza Junior e Carmello (2008), estudando os efeitos da adubação nitrogenada sobre a produção de mudas de cacau observaram que a altura das plantas respondeu significativamente a um acréscimo quadrático de nitrogênio. Os valores de altura da planta em função dos níveis de água variam desde 165,86 cm a 156,66 cm (Figura 1 A), ou seja, o aumento da quantidade de água de irrigação de 1146,35 milímetros para 1717,58 milímetros produziu uma redução de 5,5% na altura da planta. A (Figura 1 B) mostra que houve um aumento na altura da planta de 8,22% em relação a um aumento de 69,63% de nitrogênio. Souza Junior e Carmello (2008), estudando os efeitos da adubação nitrogenada sobre a produção de mudas de cacau observaram que a altura das plantas e diâmetro do caule responderam significativamente a um acréscimo quadrático de nitrogênio.

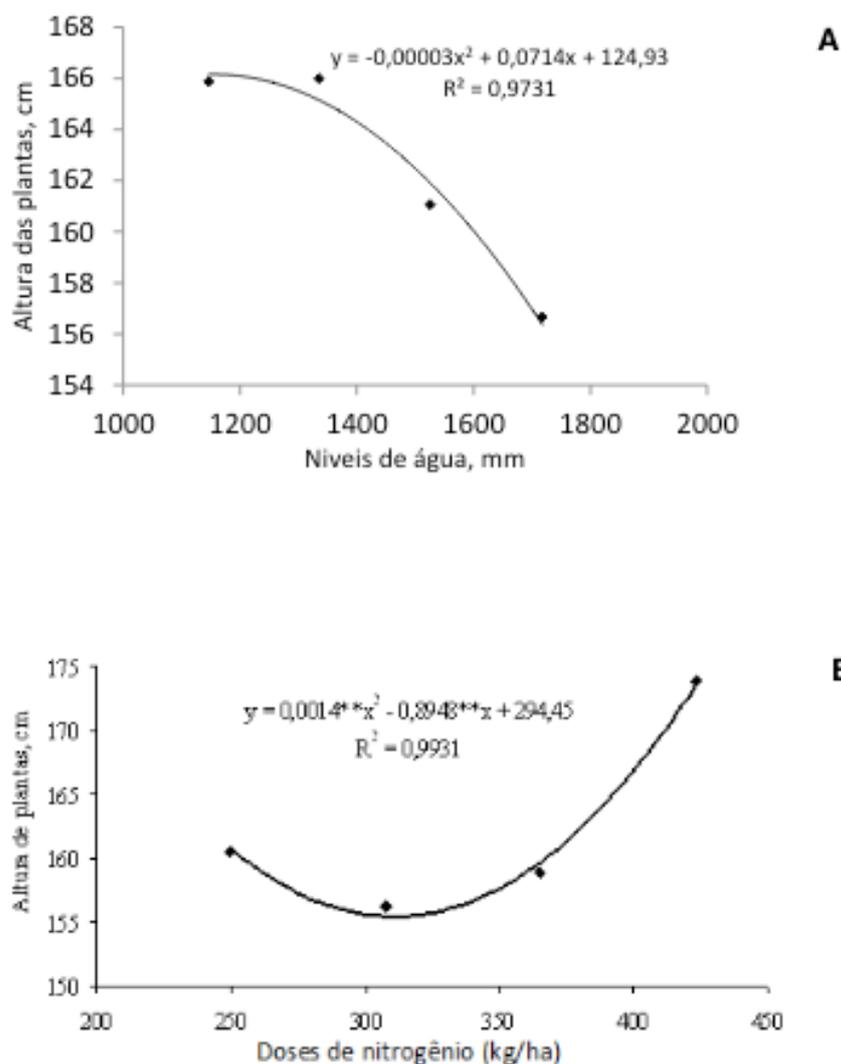


Figura 1. Altura das plantas x níveis de água (A) e altura das plantas x doses de nitrogênio (B).

#### 4 | CONCLUSÕES

Os níveis de água (L) aplicados neste estudo afetaram significativamente a altura das plantas, com probabilidade ( $0,01 < p < 0,05$ ) apenas na avaliação 6. Um aumento nos níveis de nitrogênio (N) levou a um aumento significativo ( $p < 0,01$ ) na característica de crescimento altura das plantas.

#### REFERÊNCIAS

BRAUDEAU, J. **El cacao**. Barcelona, Tradução de Cardona, A.M. H. 1.ed. Barcelona: Editorial Blume. 1970, 297 p.

OETTERER, M. Tecnologias de obtenção do cacau, produtos do cacau e do chocolate. In: OETTERER, M.; REGITANO D'ARCE, M. A.; SPOTO, M. H. F. **Fundamentos de Ciências e Tecnologia de Alimentos**. 1.ed. Barueri, SP: Manole, 2006, v. 1, p. 1-50.

SANTOS, J.W.; ALMEIDA, F.A.C.; BELTRAO, N.E.M.; CAVALCANTI, F.B. **Estatística Experimental Aplicada**. 2. ed. Campina Grande: Embrapa Algodão/UFCG, 2008. 461 p.

SILVA, F.A.S.; AZEVEDO, C.A.V. **Principal Components Analysis in the Software Assisted-Statistical Attendance**. In: WORLD CONGRESS ON COMPUTERS IN AGRICULTURE, 7, Reno-NV-USA: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2009.

SOUZA JÚNIOR, J. O.; CARMELLO, Q.A.C. Formas de adubação e doses de uréia para mudas clonais de cacau cultivadas em substrato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 6, p. 2367-2374, 2008.

## CORRELAÇÕES ENTRE AS TEORIAS DE EULER-BERNOULLI E DE SHI-VOYIADJIS PARA VIGAS: UMA ABORDAGEM TEÓRICA E NUMÉRICA

**Hilton Marques Souza Santana**

Universidade Federal de Sergipe  
São Cristóvão - SE

**Fabio Carlos da Rocha**

Universidade Federal de Sergipe  
São Cristóvão - SE

**RESUMO:** Avanços recentes na tecnologia dos materiais têm expandido a aplicação de viga na engenharia como sistema estrutural. No entanto, os efeitos da deformação por cisalhamento tornam-se mais pronunciados em vigas com relação altura/comprimento alta, devido aos baixos módulos de cisalhamento transversal em comparação com o módulo longitudinal no plano, quando sujeitas a cargas transversais. Devido às limitações existentes na teoria clássica de vigas para representar o comportamento da deflexão por cisalhamento, foi e vem sendo desenvolvidas novas teorias de vigas que inserem em sua cinemática uma descrição melhorada da variação da deformação cisalhante. Tais teorias são chamadas de teorias refinadas de vigas. Estas teorias refinadas apresentam a vantagem de não necessitarem da utilização de fatores de correção, além de melhor descrever o campo de variação da tensão de cisalhamento na seção. No entanto, nestas teorias são inseridos novos

parâmetros, sem uma interpretação física clara, o que dificulta a imposição das condições de contorno ao problema. O presente trabalho tem o objetivo de fornecer interpretação física aos parâmetros da teoria parabólica de Shi-Voyiadjis. Este objetivo é alcançado por meio do desenvolvimento da correlação entre os parâmetros de Shi-Voyiadjis e os da teoria de Euler-Bernoulli. Para a validação das imposições das condições de contorno, via correlação, foi desenvolvida, via problema variacional, a formulação em Elementos Finitos (MEF) para a teoria de Shi-Voyiadjis. Neste trabalho as formulações desenvolvidas são aplicadas à uma viga simplesmente apoiada submetida a um carregamento distribuído. Os resultados das análises demonstraram excelente concordância entre as abordagens numérica e analítica.

**PALAVRAS-CHAVE:** deformação cisalhante parabólica; vigas espessas; método dos elementos finitos; teoria de viga de Shi-Voyiadjis; teoria de viga de Euler-Bernoulli.

**ABSTRACT:** Recent advances in materials technology have expanded the use of beams as a structural system in engineering. However, as beams becomes thicker, the shear effects become more pronounced due to the low transverse modulus of elasticity, compared to the longitudinal modulus when subjected to

transverse loads. This justifies the need for a precise structural analysis formulation for beams. Due to the limitations of classical beam theory in representing shear deflection behavior, new beam theories have been developed to insert into their kinematics an improved description of the shear strain variation. Such theories are called refined theories of beams. These refined theories have the advantage of not requiring the use of correction factors, in addition to better describing the field of variation of the shear stress in the section. However, in these high-order theories, new parameters are introduced which do not have a clear physical interpretation, hindering the imposition of boundary conditions on the problem. The present work has the objective of providing physical interpretation to the parameters of the Shi-Voyiadjis theory. This objective was achieved by developing the correlation between the Shi-Voyiadjis parameters and those of the classical Euler-Bernoulli beam theory. For validating the boundary condition impositions, via theoretical correlation, a formulation based on the finite element method (FEM) for Shi-Voyiadjis theory was developed using a variational approach. In this work, the developed formulations were applied to a beam simply supported and subjected to a uniformly distributed load. The results of the analyses demonstrated excellent agreement between the numerical and analytical approaches.

**KEYWORDS:** parabolic shear deformation; thick beams; finite element method; Shi-Voyiadjis beam theory; Euler-Bernoulli beam theory.

## 1 | INTRODUÇÃO

Teorias de vigas são ferramentas importantes para a análise estrutural. Muitas das suas aplicações podem ser encontradas em elementos da construção civil, em modelos de asas de aeronaves, microtúbulos proteicos na biologia e braços robóticos na eletrônica. Dessa forma, faz-se necessária uma compreensão aprofundada da mecânica dos elementos de viga a fim de possibilitar a sua correta, segura e ótima concepção.

Para a análise de vigas unidimensionais duas classes de teorias podem ser encontradas na literatura denominada de clássicas e refinadas. Nas teorias clássicas tem-se a formulação sem consideração da deformação por cisalhamento, denominada teoria de viga de Euler-Bernoulli, e tem-se ainda a teoria com consideração da deformação cisalhante constante denominada teoria de viga de Timoshenko. Já para as teorias refinadas são consideradas cinemáticas não-lineares para consideração do campo de deslocamento longitudinal, sem a necessidade de se utilizar fatores de correção presentes na teoria de Timoshenko.

A Teoria de Euler-Bernoulli (TEB) tem como principal limitação a propriedade de ortogonalidade e planicidade da seção transversal, em relação ao eixo centroidal, após a deformação da viga. Dessa forma, a teoria de Euler-Bernoulli é mais adequada para modelagem de vigas esbeltas e tornando-se menos eficientes quando vigas moderadamente espessas são consideradas. Com intuito de contornar essa limitação da teoria de Euler-Bernoulli, em 1920, Stephen Timoshenko desenvolveu uma nova teoria

de vigas, a Teoria de Primeira Ordem (TPO). No entanto, esta teoria de Timoshenko assume um campo de deformação constante ao longo da seção transversal, violando assim a possibilidade de consideração da nulidade da tensão de cisalhamento nas bordas da viga. Sabendo-se que a distribuição de tensão cisalhante proposta pela TPO tem representatividade limitada, e com o intuito de garantir que sua energia de deformação seja consistente com as condições de tensão cisalhante nulas na borda, a teoria de Timoshenko faz uso dos chamados fatores de correção (Timoshenko, 1921). Tanto a TEB quanto a TPO possuem deficiência em capturar efeitos não-clássicos, tal como o empenamento da seção transversal da viga (Reddy, 1984). Diante destas limitações, novas teorias são necessárias para melhor descrever o comportamento do elemento estrutural de viga.

Com o objetivo de sanar as deficiências presentes nas teorias clássicas de vigas, novas teorias refinadas (ou de alta ordem) vem sendo desenvolvidas. Muitas das teorias de alta ordem se diferenciam quanto a utilização de funções que modelam a distribuição da deformação cisalhante ao longo da seção transversal. Em Levison (1981) é proposto um campo de deformação cisalhante parabólico que garante a nulidade das tensões de cisalhamento nas bordas da viga. Contudo, segundo Reddy (1984) as equações que descrevem o problema obtidas por Levinson são variacionalmente inconsistentes, por serem obtidas através das equações de equilíbrio da Teoria de Primeira Ordem (TPO). Reddy (1984) afirma ainda, que as formas corretas das equações diferenciais e condições de contorno para qualquer teoria baseada em um dado campo de deslocamento devem ser obtidas consistentemente por meio do princípio dos trabalhos virtuais.

Em Reddy et al (1997) são desenvolvidas as relações exatas entre as deflexões, rotações, esforços cortantes e momentos fletores entre a teoria parabólica e as teorias clássicas de Euler-Bernoulli e Timoshenko. Estas relações permitem uma melhor compreensão dos parâmetros de alta ordem uma vez que estes não possuem interpretação física óbvia. Por fim, Reddy et al (1997) afirma que essas relações também podem ser utilizadas para o desenvolvimento de um modelo de elementos finitos para a teoria de deformação cisalhante parabólica sem a ocorrência do enrijecimento da estrutura provocada pelo cisalhamento (*shear locking*). Recentemente, Sayyad e Ghugal (2017) realizaram uma vasta revisão crítica da literatura para a análise de flexão, flambagem e vibração sem consideração de amortecimento para vigas isotrópicas, laminadas e sanduiches. No entanto, interpretações físicas dos parâmetros de alta ordem presentes nas teorias refinadas não foram realizadas.

O presente trabalho tem o objetivo de fornecer interpretação física aos parâmetros da teoria com deformação cisalhante parabólica proposta em Shi e Voyiadjis (2011). Este objetivo é alcançado por meio do desenvolvimento da correlação entre os parâmetros da Teoria de Shi-Voyiadjis (TSV) e os da teoria clássica de vigas de Euler-Bernoulli (TEB), com uma metodologia semelhante à adotada por Reddy et al (1997). Para a validação das imposições das condições de contorno, via correlação,

foi desenvolvida, via problema variacional, a formulação em Elementos Finitos (MEF) para a teoria estudada (TSV), sem a presença do travamento por cisalhamento (*shear locking*). Para mostrar a eficiência da modelagem, apesar de ter analisado diversos problemas de viga, apenas a viga simplesmente apoiada e submetida a carregamento uniforme é apresentada.

## 2 | FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Nesta seção é abordada a cinemática e o desenvolvimento, via Princípio dos Trabalhos Virtuais, da teoria de Shi-Voyiadjis (TSV), juntamente com as suas correlações com a teoria de Euler-Bernoulli (TEB).

### 2.1 Cinemática da TEB e TSV

As cinemáticas presentes na teoria clássica de vigas (TEB) e na teoria de Shi-Voyiadjis (TSV), são ilustradas na Figura 01. Nesta figura é mostrada uma viga simplesmente apoiada, submetida a um carregamento distribuído constante  $q_0$  e comprimento  $L$ . A coordenada  $x$  representa o eixo longitudinal da viga, a coordenada  $z$  ao longo da altura da viga e a  $y$  ao longo de sua largura. Em uma teoria geral de vigas toda carga e geometria fornecem uma função deslocamento  $(u, v, w)$  ao longo dos eixos  $(x, y, z)$ , respectivamente. No entanto, devido a simetria do problema pode-se simplificar a análise apenas dependente das coordenadas  $x$  e  $z$  – assume-se que o deslocamento em  $v$  é identicamente igual a zero (Wang, Reddy e Lee, 2000).

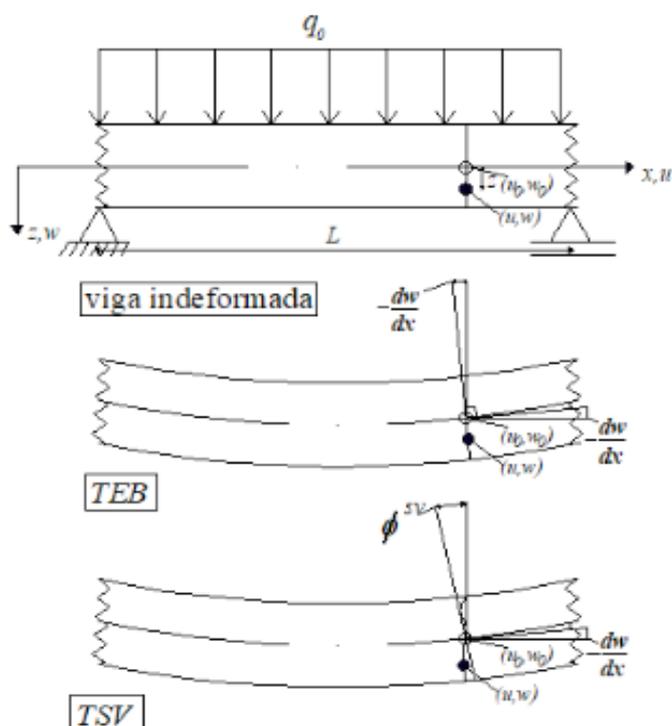


Figura 1: Geometria indeformada e deformada de uma viga submetida a flexão pela teoria clássica de Euler -Bernoulli (TEB) e pela teoria refinada parabólica de Shi-Voyiadjis(TSV)

Fonte: Adaptado de Wang, Reedy e Lee (2000).

O campo de deslocamento para a teoria clássica é dado pelas seguintes expressões

$$u^E(x, z) = -z \frac{dw_0^E}{dx} \quad (1)$$

$$w^E(x, z) = w_0^E(x) \quad (2)$$

em que  $w_0^E$  é a deflexão transversal de um ponto no eixo centroidal da viga ( $z=0$ ) e o sobrescrito “E” denota a teoria de Euler-Bernoulli. O campo de deslocamento nas Eqs.(1-2) implica que as seções perpendiculares à linha neutra permanecem planas e perpendiculares depois da deformação, como mostrado na Figura 1. Essas simplificações negligenciam a deformação normal e de cisalhamento, ambas transversais ao eixo centroidal.

As teorias de alta-ordem em especial as que consideram a deformação transversal parabólica. representam a cinemática de forma mais precisa. Isso ocorre, por meio da expansão polinomial da função deslocamento até a terceira-ordem. Neste trabalho será considerado o campo de deslocamento presente em Shi e Voyiadjis (2011), como segue abaixo:

$$u^{SV}(x, z) = z \frac{dw_0^{SV}}{dx} (A_1 - 1) + A_1 z \phi_x^{SV} - A_2 z^3 \left( \phi_x^{SV} + \frac{dw_0^{SV}}{dx} \right) \quad (3)$$

$$w^{SV}(x, z) = w_0^{SV}(x) \quad (4)$$

onde  $A_1 = 5/4$  e  $A_2 = 5/3h^2$  e  $x$  e  $z$  são as coordenadas axial e transversal da viga,  $w_0^{SV}$  é o deslocamento transversal do eixo centroidal da viga,  $\phi_x^{SV}$  representa a rotação da seção transversal em relação à linha neutra e o sobrescrito “SV” indica a teoria de viga de Shi e Voyiadjis. Note que a seção transversal não permanece plana e não está perpendicular à linha neutra (Figura 1), como supunha a simplificação de Euler-Bernoulli. Dessa forma, é possível capturar efeitos como tensão devido ao cisalhamento nulas nas bordas superior e inferior da viga, sem a necessidade de utilizar fator de correção.

## 2.2 Fundamentos teóricos para a viga de Shi-Voyiadjis

As relações deformação-deslocamento da TSV são dadas por:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u^{SV}}{\partial x} = z \frac{d^2 w_o^{SV}}{dx^2} (A_1 - 1) + z A_1 \frac{d \phi_x^{SV}}{dx} - A_2 z^3 \left( \frac{d \phi_x^{SV}}{dx} + \frac{d^2 w_o^{SV}}{dx^2} \right) \quad (5.a)$$

$$\gamma_x = \left( \frac{dw_o^{SV}}{dx} + \frac{\partial u^{SV}}{\partial z} \right) = [A_1 - 3A_2 z^2] \left( \phi_x^{SV} + \frac{dw_o^{SV}}{dx} \right) \quad (5.b)$$

Considerando a relação constitutiva linear para material isotrópico, e utilizando o Princípio dos Trabalhos Virtuais, é possível descrever a equação variacional de Euler para obter as seguintes equações de equilíbrio para a Teoria de Shi- Voyiadjis:

$$-\frac{d\hat{M}_{xx}^{SV}}{dx} + \hat{Q}_x^{SV} = 0 \quad (6.a)$$

$$-\frac{d^2 \hat{M}_{xx}^{SV}}{dx^2} - \frac{d\hat{Q}_x^{SV}}{dx} = q \quad (6.b)$$

onde:

$$\hat{M}_{xx}^{SV} = A_1 M_{xx}^{SV} - A_2 P_{xx}^{SV}, \hat{Q}_x^{SV} = A_1 Q_x^{SV} - 3A_2 R_x^{SV}, \hat{M}_{xx}^{SV} = A_2 P_{xx}^{SV} - (A_1 - 1)M_{xx}^{SV} = M_{xx}^{SV} - \hat{M}_{xx}^{SV}$$

$$M_{xx}^{SV} = \int_A z \sigma_{xx} dA = \hat{D}_{xx} \frac{d\phi^{SV}}{dx} - \hat{F}_{xx} \frac{d^2 w_o^{SV}}{dx^2} \quad (7.a)$$

$$P_{xx}^{SV} = \int_A z^3 \sigma_{xx} dA = \hat{F}_{xx} \frac{d\phi^{SV}}{dx} - \hat{H}_{xx} \frac{d^2 w_o^{SV}}{dx^2} \quad (7.b)$$

$$Q_x^{SV} = \int_A \tau_{xz} dz = \hat{A}_{xz} \left( \phi^{SV} + \frac{dw_o^{SV}}{dx} \right) \quad (7.c)$$

$$R_x^{SV} = \int_A z^2 \tau_{xz} dz = \hat{D}_{xz} \left( \phi^{SV} + \frac{dw_o^{SV}}{dx} \right) \quad (7.d)$$

$$\hat{D}_{xx} = A_1 D_{xx} - A_2 F_{xx}, \hat{F}_{xx} = A_2 F_{xx} - (A_1 - 1)D_{xx}, \hat{F}_{xx} = A_1 F_{xx} - A_2 H_{xx}, \hat{H}_{xx} = A_2 H_{xx} - (A_1 - 1)F_{xx},$$

$$\hat{A}_{xz} = A_1 A_{xz} - 3A_2 D_{xz}, \hat{D}_{xz} = A_1 D_{xz} - 3A_2 F_{xz}$$

$$(A_{xx}, D_{xx}, F_{xx}, H_{xx}) = \int_A (1, z^2, z^4, z^6) E_x dA, (A_{xz}, D_{xz}, F_{xz}) = \int_A (1, z^2, z^4) G_{xz} dA$$

$E_x, G_{xz}$  são o módulo de Elasticidade longitudinal e transversal, respectivamente.

As condições de contorno são:

$$\text{Especificado: } \left\{ \begin{array}{l} w_o^{SV} \\ \frac{dw_o^{SV}}{dx} \\ \phi^{SV} \end{array} \right\} \text{ ou } \left\{ \begin{array}{l} \hat{V}_x^{SV} = \frac{d\hat{M}_{xx}^{SV}}{dx} + \hat{Q}_x^{SV} \\ -\hat{M}_{xx}^{SV} \\ \hat{M}_{xx}^{SV} \end{array} \right\}$$

onde  $\hat{V}_x^{SV}$  é a força cisalhante efetiva,  $-\hat{M}_{xx}^{SV}$  e  $\hat{M}_{xx}^{SV}$  são momentos de alta ordem da TSV. O total de seis condições de contorno é requerido, uma vez que a teoria é de sexta ordem enquanto as teorias clássicas são de quarta ordem.

### 2.3 Relações entre a teoria de Euler-Bernoulli com a teoria de Shi-Voyadjis

Nesta seção são desenvolvidas as relações para a análise de flexão entre as teorias de Shi-Voyadjis e a teoria clássica (TEB), de forma semelhante ao realizado por Reddy et al (1997). São explicitados o cortante, momento fletor, rotação e deflexão em função dos termos já difundidos da teoria clássica (TEB). É possível observar que uma equação diferencial adicional de segunda ordem se faz necessária uma vez que TSV é de sexta ordem e TEB de quarta ordem.

Primeiramente, substituindo a Eq. (6.a) em (6.b), tem-se:

$$-\frac{d^2 M_{xx}^{SV}}{dx^2} = q \quad (8)$$

Impondo a equação diferencial da TEB ( $-d^2 M_{xx}^E / dx^2$ ) =  $q$  na Eq. (8) e integrando duas vezes:

$$M_{xx}^{SV} = M_{xx}^E + C_1 x + C_2 \quad (9)$$

em que  $M_{xx}^E$  é o momento fletor para a TEB. Substituindo Eq. (7.c) em Eq. (7.a-d), e substituindo  $P_{xx}^{SV}$  e  $R_x^{SV}$  na Eq. (6.a), obtém-se:

$$\frac{\hat{D}_{xx}}{D_{xx}} \frac{dM_{xx}^{SV}}{dx} = \frac{\bar{A}_{xx} Q_x^{SV}}{\hat{A}_{xx}} - A_2 \left( \frac{F_{xx}}{D_{xx}} \frac{\hat{D}_{xx}}{\hat{A}_{xx}} - \frac{\hat{F}}{\hat{A}_{xx}} \right) \frac{d^2 Q_x^{SV}}{dx^2} \quad (10)$$

com  $\bar{A}_{xx} = A_1 \hat{A}_{xx} - 3A_2 \hat{D}_{xx}$

Substituindo a Eq. (9) em (10), tem-se:

$$A_2 \left( \frac{F_{xx}}{D_{xx}} \frac{\hat{D}_{xx}}{\hat{A}_{xx}} - \frac{\hat{F}}{\hat{A}_{xx}} \right) \frac{d^2 Q_x^{SV}}{dx^2} - \frac{\bar{A}_{xx} Q_x^{SV}}{\hat{A}_{xx}} + \frac{\hat{D}_{xx}}{D_{xx}} (Q_x^E + C_1) = 0 \quad (11)$$

Dessa forma, uma equação diferencial de segunda ordem deve ser resolvida a fim de determinar  $Q_x^{SV}$  em termos de  $Q_x^E$ . Uma vez conhecido o  $Q_x^{SV}$ ,  $M_x^{SV}$ ,  $\phi^{SV}$ , e  $w_0^{SV}$  poderão ser determinados com as relações que serão mostradas na sequência.

A força cisalhante efetiva  $V_x^{SV}$  na teoria unificada pode ser simplificada usando as Eqs. (6.a),(6.b) e (10):

$$\hat{V}_x^T = \frac{d\hat{M}_{xx}^{SV}}{dx} + \hat{Q}_x^{SV} = A_2 \frac{dP_{xx}^{SV}}{dx} - (A_1-1) \frac{dM_{xx}^{SV}}{dx} + A_1 Q_x^{SV} - 3A_2 R_x^{SV} = (Q_x^E + C_1) \quad (12)$$

Para determinar  $\phi^{SV}$ , substituímos Eq. (7.c) e (9) em (7.a), e integrando uma vez:

$$D_{xx} \phi_x^{SV}(x) = -D_{xx} \frac{dw_0^E}{dx} + \frac{\hat{F}_{xx}}{A_{xx}} Q_x^T + C_1 \frac{x^2}{2} + C_2 x + C_3 \quad (13)$$

Por fim, obtém-se a relação entre  $w_0^{SV}$  e  $w_0^E$  substituindo (7.c) em (13), e integrando em relação a x:

$$D_{xx} w_0^{SV} = D_{xx} w_0^E + \frac{\hat{D}_{xx}}{A_{xx}} \left( \int Q_x^T(\eta) d\eta \right) - C_1 \frac{x^3}{2} - C_2 \frac{x^2}{2} - C_3 x - C_4 \quad (14)$$

Portanto, essa é a completa derivação das relações entre as soluções da teoria de Euler-Bernoulli e a teoria de Shi-Voyiadjis. As constantes de integração,  $C_1, C_2, C_3$  e  $C_4$  são determinadas a partir das condições de contorno. As condições de contorno para problemas de vigas são:

$$\begin{array}{l} \text{Livre:} \\ \text{Engaste:} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \hat{V}_x^{SV} = 0 = A_2 \frac{dP_{xx}^{SV}}{dx} - (A_1-1) \frac{dM_{xx}^{SV}}{dx} + A_1 Q_x^T - 3A_2 R_x^{SV} \\ \hat{M}_{xx}^{SV} = 0 = A_2 P_{xx}^{SV} - (A_1-1) M_{xx}^{SV} \\ \hat{M}_{xx}^{SV} = 0 = A_1 M_{xx}^{SV} - A_2 P_{xx}^{SV} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} w_0^{SV} = 0 \\ \phi^{SV} = 0 \\ \frac{dw^{SV}}{dx} = 0 \end{array} \right.$$

$$\text{Apoio:} \left\{ \begin{array}{l} w_0^{SV} = 0 \\ \hat{M}_{xx}^{SV} = 0 = A_2 P_{xx}^{SV} - (A_1-1) M_{xx}^{SV} \\ \hat{M}_{xx}^{SV} = 0 = A_1 M_{xx}^{SV} - A_2 P_{xx}^{SV} \end{array} \right.$$

Dessa maneira, as condições associadas ao termo  $Q_x^{SV}$  são:

**Livre:** Impondo as condições de contorno nas Eqs (7.b), tem-se:

$$\mathcal{P}_{xx}^{SV} = \left( \frac{\widehat{F}_{xx}}{\widehat{A}_{xz}} - \frac{F_{xx} \widehat{D}_{xx}}{D \widehat{A}_{xz}} \right) \frac{dQ_x^{SV}}{dx} + \frac{F_{xx}}{D} \widehat{M}_{xx}^{SV} \Rightarrow \frac{dQ_x^{SV}}{dx} = 0 \quad (15)$$

**Apoio:** Fazendo as condições de contorno em (7.b) , tem-se:

$$\mathcal{P}_{xx}^{SV} = \left( \frac{\widehat{F}_{xx}}{\widehat{A}_{xz}} - \frac{F_{xx} \widehat{D}_{xx}}{D \widehat{A}_{xz}} \right) \frac{dQ_x^{SV}}{dx} + \frac{F_{xx}}{D} \widehat{M}_{xx}^{SV} \Rightarrow \frac{dQ_x^{SV}}{dx} = 0 \quad (16)$$

**Engaste:** Fazendo as condições de contorno em (7.c), tem-se:

$$Q_x^{SV} = \widehat{A}_{xz} \left( \phi^{SV} + \frac{dy_o^{SV}}{dx} \right) \Rightarrow Q_x^{SV} = 0 \quad (17)$$

Utilizando o método da Variação de Parâmetros é construída a solução da Eq.(11) a qual é apresentada:

$$Q_x^{SV} = \bar{C}_5 \sinh(\lambda x) + \bar{C}_6 \cosh(\lambda x) + Q_P^{SV} \quad (18)$$

Em que:

$$Q_P^{SV} = \left[ \frac{-\mu}{2\lambda} \int e^{-x\lambda} (Q^E + C_1) dx \right] e^{\lambda x} + \left[ \frac{\mu}{2\lambda} \int e^{x\lambda} (Q^E + C_1) dx \right] e^{-\lambda x} \quad (19)$$

$$\lambda^2 = D_{xx} \bar{A}_{xz} / A_2 (F\widehat{D} - D\widehat{F}) \quad \text{e} \quad \mu = \widehat{D}_{xx} \widehat{A}_{xz} / A_2 (F\widehat{D} - D\widehat{F}) \quad (20)$$

## 2.4 Aplicação das correlações entre a TSV e TEB

Nesta seção será feita uma aplicação da teoria de Shi-Voyiadjis para uma viga isotrópica simplesmente apoiada submetida a um carregamento uniformemente distribuído, mostrada na Figura 1.

Conhecido o esforço cortante da teoria de Euler-Bernoulli:

$$Q_x^E = \frac{q_0}{2} (L - 2x) \quad (21)$$

Substituindo a Eq. (21) em (18), e impondo as condições de contorno da Eq. (16):

$$Q_x^{SV} = \frac{\mu q_0}{\lambda^3} \sinh(\lambda h) + \frac{-\mu \left[ \tanh\left(\frac{L\lambda}{2}\right) \right] q_0}{\lambda^3} \cosh(\lambda h) + \frac{\mu}{\lambda^2} \left[ \frac{q_0(L-2x)}{2} + C_1 \right] \quad (22)$$

Pelas condições de contorno elencadas anteriormente, tem-se:

$$\begin{aligned} w^E(0) = w^E(L) = M^E(0) = M^E(L) = 0 \\ w^{SV}(0) = w^{SV}(L) = M^{SV}(0) = M^{SV}(L) = P(0) = P(L) = 0 \end{aligned}$$

Assim, as constantes  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  e  $C_4$  podem ser obtidas substituindo as condições de contorno na Eq. (9), Eq.(10) e Eq.(14) assim:

$$C_1 = 0, C_2 = 0, C_3 = 0, C_4 = \frac{\hat{D}}{\hat{A}_{xx}} \frac{\mu q_0}{\lambda^4}$$

Por fim, pode-se reescrever a força cisalhante, momento de primeira ordem, rotação e deflexão da TSV:

$$V_x^{SV} = (Q_x^E + C_1) = Q_x^E, \quad M_{xx}^{SV} = M_{xx}^E + C_1 x + C_2 = M_{xx}^E \quad (23)$$

$$\phi_x^{SV} = -\frac{dw_0^E}{dx} + \frac{\hat{F}_{xx}}{\hat{A}_{xx} D_{xx}} Q_x^E + \frac{C_1}{D_{xx}} \frac{x^2}{2} + \frac{C_2}{D_{xx}} x + \frac{C_3}{D_{xx}} = -\frac{q_0(L^3 - 6Lx^2 + 4x^2)}{24D_{xx}} \quad (24)$$

$$w_0^{SV} = w_0^E + \frac{\hat{D}_{xx}}{\hat{A}_{xx} D_{xx}} \left\{ \frac{\mu q_0}{\lambda^4} \left[ -\tanh\left(\frac{L\lambda}{2}\right) \sinh(x\lambda) + \cosh(x\lambda) + \frac{\lambda^2 x(L-x)}{2} - 1 \right] \right\} \quad (25)$$

Dessa forma, se observa que os esforços internos e a rotação nesse exemplo são os mesmos apresentados pela teoria de Euler-Bernoulli enquanto que a deflexão é a mesma que apresentada pela teoria de Reddy em Wang, Reddy et al (2000).

O presente trabalho apresenta também o deslocamento axial (Eq. 3), tensão normal, tensão cisalhante e a deflexão transversal (Eq.25) desse mesmo exemplo. Os resultados são obtidos para uma viga moderadamente espessa ( $L/h=2$ ) feita de material isotrópico com coeficiente de Poisson  $\nu=0,3$ . Os deslocamentos e tensões são apresentados na forma adimensional para o carregamento distribuído, construído por meio das seguintes relações:

$$\bar{u}(0, z) = \frac{u E b h^2}{q_0 L^3}, \quad \bar{\sigma}_x\left(\frac{L}{2}, z\right) = \frac{b \sigma_x}{q_0}, \quad \bar{w}(x, 0) = \frac{10 w E b h^3}{q_0 L^4}, \quad \bar{\tau}_{zx}(0, z) = \frac{b \tau_{zx}}{q_0}$$

onde  $\bar{u}$  é o deslocamento adimensional da seção transversal,  $\bar{w}$  é a deflexão adimensional do eixo centroidal,  $\bar{\sigma}_x$  é a tensão normal adimensional,  $\bar{\tau}_{zx}$  é a tensão de cisalhamento adimensional. Dessa forma, na Figura 2 são feitas comparações entre TSV, TEB e a teoria exata da elasticidade (TE) para uma viga espessa ( $L/h=2$ ). Pode-se constatar (Figura 2) que a TSV apresenta boa aproximação em relação a TE. Já para o deslocamento transversal, a TSV melhor representa a solução da TE quando comparado com a TEB. Chama-se a atenção que todos os erros das análises foram inferiores a 6%, quando comparados entre as teorias TSV e a TE.

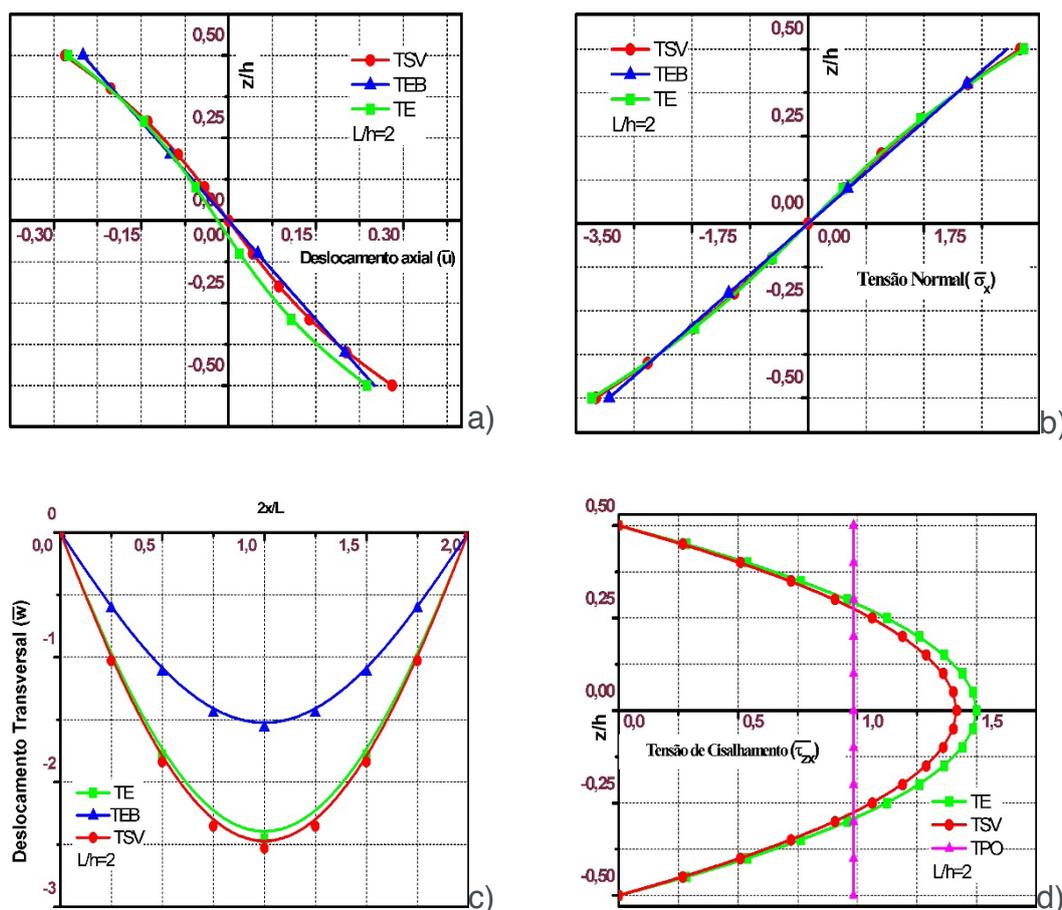


Figura 2. Distribuição dos campos: a) deslocamento  $\bar{u}$ , b) tensão normal  $\bar{\sigma}_x$ , c)  $\bar{w}$  deslocamento transversal e d) tensão de cisalhamento transversal  $\bar{\tau}_{zx}$ .

Fonte: (Autores, 2018)

### 3 | MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Nesta seção é abordado o desenvolvimento variacional da formulação fraca, via Método de Ritz, e a utilização das funções interpoladoras cúbica de Hermite para  $w_0^{sv}$  e  $dw_0^{sv}/dx$ , além da função quadrática de Lagrange para  $\phi_0^{sv}$ .

#### 3.1 Formulação fraca para TSV

Inicia-se a construção da formulação fraca para um elemento de domínio

$\Omega^e = (x_a, x_b)$ , por meio da multiplicação de ambas as equações que descrevem o problema (6.a e 6.b) por funções arbitrárias  $\psi(x)$  e  $\nu(x)$  denominadas peso ou ponderadoras, para obter as seguintes equações:

$$\int_{x_a}^{x_b} \psi(x) \left[ -\frac{d\hat{M}_{xx}^{SV}}{dx} + \hat{Q}_x^{SV} \right] dx = 0 \quad (26)$$

$$\int_{x_a}^{x_b} \nu(x) \left[ -\frac{d^2\bar{M}_{xx}^{SV}}{dx^2} - \frac{d\hat{Q}_x^{SV}}{dx} - q \right] dx = 0 \quad (27)$$

Integrando a Eq.(26) e Eq.(27), tem-se:

$$\begin{aligned} \int_{x_a}^{x_b} \frac{d\psi}{dx} \hat{M}_{xx}^{SV} + \psi \hat{Q}_x^{SV} dx - \psi \hat{M}_{xx}^{SV} \Big|_{x_a}^{x_b} &= 0 \\ - \int_{x_a}^{x_b} \left( \frac{d^2\nu}{dx^2} \bar{M}_{xx}^{SV} - \frac{d\nu}{dx} \hat{Q}_x^{SV} \right) dx - \int_{x_a}^{x_b} (\nu q) dx &= \nu \hat{V}_x^{SV} \Big|_{x_a}^{x_b} - \frac{d\nu}{dx} \bar{M}_{xx}^{SV} \Big|_{x_a}^{x_b} \end{aligned}$$

substituindo os termos definidos nas Eqs. (6), chega-se ao problema variacional:

$$a(\nu, w) + b(\nu, \phi) = L_2(\nu) \quad (28.a)$$

$$c(\psi, w) + d(\psi, \phi) = L_2(\psi) \quad (28.b)$$

onde:

$$\begin{aligned} a(\nu, w) &= \int_{x_a}^{x_b} \left[ T_1 \frac{d\nu}{dx} \frac{dw_0^{SV}}{dx} - T_6 \frac{d^2\nu}{dx^2} \frac{d^2w_0^{SV}}{dx^2} \right] dx, \quad b(\nu, \phi) = \int_{x_a}^{x_b} \left[ T_1 \frac{d\nu}{dx} \phi_x^{SV} - T_5 \frac{d^2\nu}{dx^2} \frac{d\phi_x^{SV}}{dx} \right] dx \\ L_1(\nu) &= \int_{x_a}^{x_b} (\nu q) dx + \nu(x_b) \hat{V}_x^{SV}(x_b) - \nu(x_a) \hat{V}_x^{SV}(x_a) - \frac{d\nu}{dx} \Big|_{x_b} \bar{M}_{xx}^{SV}(x_b) + \frac{d\nu}{dx} \Big|_{x_a} \bar{M}_{xx}^{SV}(x_a) \\ Q_1 &= -\hat{V}_x^{SV}(x_a), \quad Q_2 = -\bar{M}_{xx}^{SV}(x_a), \quad Q_3 = \hat{V}_x^{SV}(x_b), \quad Q_4 = \bar{M}_{xx}^{SV}(x_b) \\ T_5 &= A_2 \hat{F}_{xx} - (A_1 - 1) \hat{D}_{xx}, \quad T_6 = \hat{F}_{xx} (A_1 - 1) - A_2 \hat{H}_{xx} \\ c(\psi, w) &= \int_{x_a}^{x_b} \left\{ T_1 \psi \frac{dw_0^{SV}}{dx} - T_2 \frac{d\psi}{dx} \frac{d^2w_0^{SV}}{dx^2} \right\} dx, \quad d(\psi, \phi) = \int_{x_a}^{x_b} \left\{ T_1 \psi \phi_x^{SV} + T_3 \frac{d\psi}{dx} \frac{d\phi_x^{SV}}{dx} \right\} dx \\ L_2(\psi) &= \psi(x_b) \hat{M}_{xx}^{SV}(x_b) - \psi(x_a) \hat{M}_{xx}^{SV}(x_a), \quad Q_5 = -\hat{M}_{xx}^{SV}(x_a), \quad Q_6 = \hat{M}_{xx}^{SV}(x_b) \\ T_1 &= A_1 \hat{A}_{xx} - 3A_2 \hat{D}_{xx}, \quad T_2 = A_1 \hat{F}_{xx} - A_2 \hat{H}_{xx}, \quad T_3 = A_1 \hat{D}_{xx} - A_2 \hat{F}_{xx} \end{aligned}$$

### 3.2 Formulação do MEF aplicado à TSV (MEF-SV)

Para o desenvolvimento do MEF em conjunto com a teoria de Shi- Voyiadjis, aqui denominado de MEF-SV, são consideradas as aproximações para  $w_0^{SV}(x)$  e  $\phi_x^{SV}(x)$  da seguinte forma:

$$w_0^{SV}(x) \approx \sum_{j=1}^m d_j \phi_j^{(1)}(x), \quad \phi_x^{SV}(x) \approx \sum_{j=1}^n p_j \phi_j^{(2)}(x)$$

onde  $\phi_j^{(1)}$  e  $\phi_j^{(2)}$  são funções interpoladoras polinomiais,  $d_j$  são os valores nodais constituídos por  $w_0^{SV}(x)$  e  $p_j$  são os valores nodais constituídos por  $\phi_x^{SV}(x)$ . Pelo Método de Galerkin, faz-se  $v \approx \varphi_i^{(1)}$  e  $\psi \approx \varphi_i^{(2)}$  na formulação fraca das Eqs. 28 para obter:

$$\begin{bmatrix} [K^{11}] & [K^{12}] \\ [K^{21}] & [K^{22}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{d\} \\ \{p\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F^1\} \\ \{F^2\} \end{Bmatrix} \quad (29)$$

onde:

$$K_{ij}^{11} = a(\varphi_i^{(1)}, \varphi_j^{(1)}), \quad K_{ij}^{12} = b(\varphi_i^{(1)}, \varphi_j^{(2)}), \quad K_{ij}^{21} = c(\varphi_i^{(2)}, \varphi_j^{(1)}), \quad K_{ij}^{22} = d(\varphi_i^{(2)}, \varphi_j^{(2)})$$

$$F^1 = L_1(\varphi_i^{(1)}), \quad F^2 = L_2(\varphi_i^{(2)})$$

Para contornar o problema de shear locking, neste trabalho foi considerado funções aproximadoras para  $\phi_0^{SV}$  de um grau a menos que  $w_0^{SV}$ . Nesse sentido, foi realizada a interpolação cúbica de Hermite para os parâmetros ( $w_0^{SV}$  e  $dw_0^{SV}/dx$ ), além de uma interpolação quadrática para  $\phi_0^{SV}$ . Assim, obtém-se a seguinte equação para o modelo em elementos finitos:

$$\begin{aligned}
& \mathbf{K} \begin{bmatrix} 12 & L(1+5\theta) & -12 & L(1+5\theta) & L(-1+5\theta) & -8L & L(-1+5\theta) \\ L(1+5\theta) & \frac{4}{3} \frac{L^2}{L} (1+2\theta) & -L(1+5\theta) & -\frac{1}{3} \frac{L^2}{L} (-1+7\theta) & -\frac{1}{3} \frac{L^2}{L} (7+11\theta) & -\frac{2}{3} \frac{L^2}{L} (1+5\theta) & -\frac{1}{3} \frac{L^2}{L} (-1+3\theta) \\ -12 & -L(1+5\theta) & 12 & -L(1+5\theta) & -L(-1+5\theta) & 8L & -L(-1+5\theta) \\ L(1+5\theta) & -\frac{1}{3} \frac{L^2}{L} (-1+7\theta) & -L(1+5\theta) & \frac{4}{3} \frac{L^2}{L} (1+2\theta) & -\frac{1}{3} \frac{L^2}{L} (-1+3\theta) & -\frac{2}{3} \frac{L^2}{L} (1+5\theta) & -\frac{1}{3} \frac{L^2}{L} (7+11\theta) \\ L(-1+5\theta) & -\frac{1}{3} \frac{L^2}{L} (7+11\theta) & -L(-1+5\theta) & -\frac{1}{3} \frac{L^2}{L} (-1+3\theta) & -\frac{1}{3} \frac{L^2}{L} (4+591\theta) & -\frac{2}{3} \frac{L^2}{L} (-1+341\theta) & -\frac{1}{3} \frac{L^2}{L} (-1+86\theta) \\ -8L & -\frac{2}{6} \frac{L^2}{L} (1+5\theta) & 8L & -\frac{2}{6} \frac{L^2}{L} (1+5\theta) & -\frac{2}{6} \frac{L^2}{L} (-1+341\theta) & -\frac{16}{3} \frac{L^2}{L} (1+84\theta) & -\frac{2}{3} \frac{L^2}{L} (-1+341\theta) \\ L(-1+5\theta) & -\frac{1}{2} \frac{L^2}{L} (-1+3\theta) & -L(-1+5\theta) & -\frac{1}{6} \frac{L^2}{L} (7+11\theta) & -\frac{1}{3} \frac{L^2}{L} (-1+86\theta) & -\frac{2}{3} \frac{L^2}{L} (-1+341\theta) & -\frac{1}{3} \frac{L^2}{L} (4+591\theta) \end{bmatrix} \\
& \times \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \\ p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \\ Q_5 \\ Q_c \\ Q_6 \end{Bmatrix}
\end{aligned} \tag{30}$$

onde:

$$\tilde{\mathbf{K}} = 1/84L^3, \quad \Theta = D_{xx} / \Omega, \quad \Omega = D_{xx} + 7AL^2G_{xz}, \quad q_i = (L/2) \int_{-1}^1 \varphi_i^{(1)} q(\xi) d\xi, \quad (i = 1, 2, 3, 4)$$

$A$  e  $L$  são a área e o comprimento do elemento, respectivamente.  $Q_i$  ( $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ ) são as forças generalizadas definidas nas Eqs. 28 e  $Q_c$  é obtida como combinação linear de  $Q_5$  e  $Q_6$ .

### 3.3 Aplicação numérica

A matriz de rigidez da Eq. (30) pode ser usada para a resolução dos mais variados problemas de vigas. A seguir é mostrado sua aplicação para a viga simplesmente apoiada e moderadamente espessa ( $L/h=2$ ), apresentada na Figura 1. Nesse exemplo foram analisados (Figura 3) o comportamento dos campos de respostas (deslocamentos axial e transversal; tensões normal e cisalhante) da MEF-SV em comparação com a TE, à medida que é elevada a quantidade de elementos (2,4,8,16 e 32). Em todos os campos de respostas presentes na Figura 3 é observado uma boa concordância entre os resultados obtidos pelo MEF-SV e a TE. Observação adicional é realizada para destacar que os campos de deslocamento (Figura 3a e c) ficam inalterados, e com erro em relação a TE, inferiores a 3%, à medida que o número de elementos é aumentado. Já para os campos de tensão (Figura 3b e d), há alteração em suas curvas de respostas para atingir a convergência com erro máximo, em relação à TE, inferior a 5,6% para a tensão de cisalhamento e 1,87 % para a tensão normal.

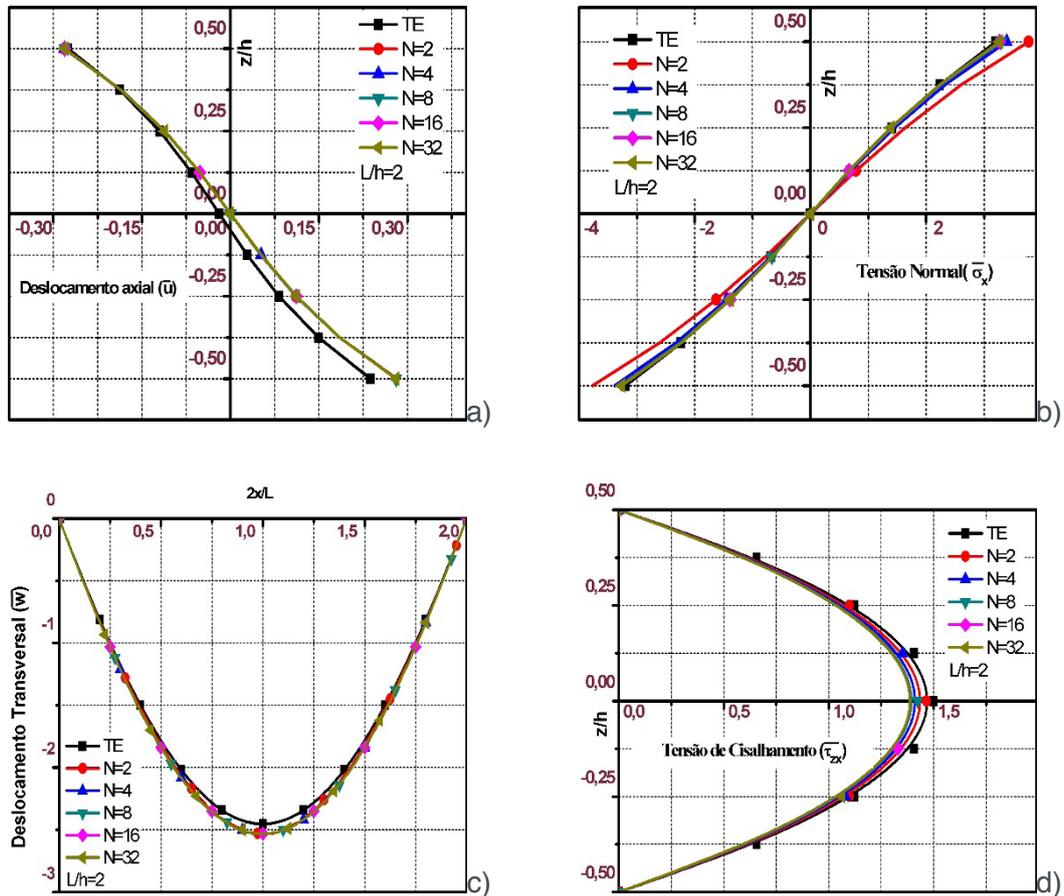


Figura 3. Distribuição dos campos de resposta do MEF-SV em comparação com a Teoria da Elasticidade (TE) conforme se eleva a quantidade de elementos (N).

Fonte: (Autores, 2018)

Uma vez estabilizado os campos de resposta para o MEF-SV com 8 elementos, é realizada a análise, para a máxima deflexão, do efeito do travamento por cisalhamento (shear locking), à medida que a relação  $L/h$  é aumentada (ver Figura 4).

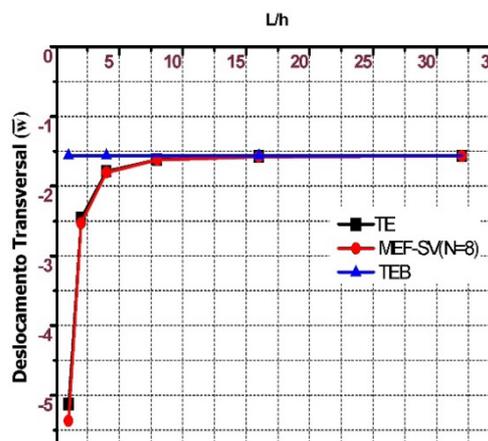


Figura 4. Análise de travamento devido ao aumento de esbelteza (shear locking)

Fonte: (Autores, 2018)

Por meio da Figura 4, é observado que o campo de resposta do deslocamento transversal obtido pelo MEF-SV é concordante com a solução da teoria da Elasticidade,

evidenciando o não-shear locking. No entanto, quando a resposta é obtida pela teoria clássica de Euler-Bernoulli (TEB), os resultados tornam-se discrepantes da TE, à medida que a relação  $L/h$  é pequena (espessa).

## 4 | CONCLUSÕES

O presente trabalho abordou diversos aspectos da teoria de Shi- Voyiadjis. Primeiramente foram desenvolvidas correlações entre a TEB e a TSV, uma vez que a teoria de Shi- Voyiadjis apresenta parâmetros de alta ordem e com interpretação física não óbvia. Na sequência foi realizada a construção do modelo em elementos finitos para a TSV, aqui denominada de MEF-SV. Para a construção do MEF-SV foi utilizado o método variacional de Ritz, apresentando as condições de contorno, essenciais e naturais, para a construção do campo aproximador. Para a aproximação de  $(w_0^{sv}$  e  $dw_0^{sv} / dx)$  foi utilizado o polinômio cúbico de Hermite e para a rotação  $(\phi_0^{sv})$  polinômio quadrático de Lagrange. Essa ordem inferior da aproximação de Lagrange em relação à de Hermite proporcionou a ausência do travamento devido ao cisalhamento, à medida que a relação  $L/h$  aumenta. A partir da construção do MEF-SV é explicitada sua matriz de rigidez e seu vetor de carregamento, os quais podem ser de fácil implementação computacional. Por fim, os resultados numéricos do MEF-SV apresentaram boa aproximação com relação à teoria da elasticidade, com erro máximo inferior a 6% para todas as análises.

## 5 | AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código 001 pelo apoio financeiro. Este trabalho foi apresentado no XIII SIMMEC 2018 – Simpósio de Mecânica Computacional.

## REFERÊNCIAS

Levinson, M.,1981. **A new rectangular beam theory**. Journal of Sound and Vibration, vol. 74, pp. 81–87.

Reddy J.N.,1984. **A simple higher-order theory for laminated composite plates**. ASME Journal Applied Mechanics, vo51, pp. 745–52.

Reddy, J.N., Wang C.M.,& Lee K.H.,1997. **Relationships between bending solutions of classical and shear deformation theories**. International Journal of Solids and Structures,,vol.34, pp. 3373–3384.

Sayyad, A. S., & Ghugal, Y. M.,2017. **Bending, buckling and free vibration of laminated composite and sandwich beams: A critical review of literature**. Composite Structures, vol. 171, n. 10, pp. 486–504.

Shi, G., & Voyiadjis, G. Z.,2011. **A Sixth-Order Theory of Shear Deformable Beams with Variational Consistent Boundary Conditions**. Journal of Applied Mechanics, vol. 78, n. 2, pp. 21019-1-10.

Timoshenko, S. P., 1921.**On the Correction for Shear of the Differential Equation for Transverse Vibrations of Prismatic Bars**. Philosophical Magazine, series 6, vol. 41, pp. 742–746.

Wang C.M, Reddy J.N,& Lee K.H.,2000. **Shear deformable beams and plates: relationships with classical solutions**. Elsevier Science Ltd.

## EFICIÊNCIA DOS PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS NA REDUÇÃO DA DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO (DQO)

### Júlia Buffon

Universidade Comunitária da Região de Chapecó  
– UNOCHAPECÓ  
Chapecó – SC

### Laura Cerezolli De Carli

Universidade Comunitária da Região de Chapecó  
– UNOCHAPECÓ  
Chapecó – SC

### Gabriela Madella Kranz

Universidade Comunitária da Região de Chapecó  
– UNOCHAPECÓ  
Chapecó – SC

### Maria Luiza Danielli Zanandréa

Universidade Comunitária da Região de Chapecó  
– UNOCHAPECÓ  
Chapecó – SC

### Murilo Cesar Costelli

Universidade Comunitária da Região de Chapecó  
– UNOCHAPECÓ  
Chapecó – SC

**RESUMO:** A exponencial preocupação com o meio ambiente tem levantado discussões sobre o tratamento de efluentes líquidos, e um dos processos que tem se destacado para esse tratamento são os Processos Oxidativos Avançados (POAs). Estes baseiam-se na geração de radicais hidroxilas que desencadeiam reações de oxidação dos compostos complexos presentes no resíduo.

Essa técnica apresenta ampla utilização, visto que possui grande eficiência, baixo custo e não há geração de resíduo. O objetivo do trabalho foi estudar a eficiência dos POAs na redução da demanda química de oxigênio (DQO) de efluentes líquidos de laboratórios de química. Foram utilizadas amostras de efluente bruto com pH 0,4 e também com pH ajustado para 3,8. Testou-se o processo de tratamento através da adição de peróxido de hidrogênio e reagente fenton ( $H_2O_2 + FeSO_4$ ), seguido de processo de coagulação e floculação. No efluente bruto foi encontrada uma DQO inicial de 44580  $mgO_2/L$ . O melhor resultado para o tratamento foi com pH de 3,8 em ambos os agentes oxidantes. Para as amostras tratadas somente com peróxido de hidrogênio foi encontrada uma DQO de 15400  $mgO_2/L$ , resultando em uma eficiência de remoção de 65,46 %. Já para as amostras tratadas com reagente fenton, encontrou-se uma DQO de 24900  $mgO_2/L$ , resultando em 44,15 % de eficiência. Portanto, apesar da boa eficiência, a DQO do resíduo ainda permanece alta, comprovando a complexidade do mesmo. Contudo, a técnica aplicada apresenta um bom potencial para o tratamento deste tipo de efluente.

**PALAVRAS-CHAVE:** efluente, POA, DQO.

**ABSTRACT:** The exponential concern with the environment has raised discussions about the

treatment of liquid waste, and one of the processes used for such treatment are the Advanced Oxidative Processes (AOPs). They are based on the generation of hydroxyl radicals which acts by degrading complex compounds present in the residue. This technique is widely used, since it has great efficiency, low cost and there is no residue generation. The objective of this work was to study the efficiency of AOP in reducing the chemical oxygen demand (COD) in the liquid waste. Samples of crude residue were used with pH 0.4 and also with 3.8 pH adjusted. The treatment process was tested by the addition of hydrogen peroxide and reagent fenton ( $H_2O_2 + FeSO_4$ ), ending treatment with the process of coagulation and flocculation. In the crude residue was found COD of 44580 mg  $O_2/L$ . The best result for the treatment was with 3.8 pH, in both oxidizing agents. For samples treated only with hydrogen peroxide a COD of 15400 mg  $O_2/L$  was found, resulting in 65,46 % removal efficiency. For samples treated only with fenton reagent a COD of 24900 mg  $O_2/L$  was found, resulting in 44.15 % removal efficiency. In short, despite the good efficiency, the COD residue remains high, proving the complexity of the same. However, the applied technique presents a good potential for the treatment of this type of residue.

**KEYWORDS:** residue, AOP, COD.

## 1 | INTRODUÇÃO

A preocupação com o meio ambiente tem se mostrado mais relevante nos últimos anos, visto que a demanda por recursos naturais, bem como o despejo de resíduos no meio ambiente aumentou significativamente. Esses fatores estão se tornando cada vez mais relevantes em razão do aumento de processos industriais e da escassez de recursos naturais (FREIRE et al., 2000).

O tratamento dos resíduos líquidos, sejam provenientes de processos industriais ou de esgoto domésticos, estão em ampla discussão e inovação nos últimos anos. O despejo desses resíduos no meio ambiente sem tratamento prévio, causa grande contaminação nos recursos hídricos devido a alta toxicidade e carga orgânica (MAIA, A. S., OLIVEIRA, W. O., OSORIO, V. K. L., 2003 apud MOREIRA; MOREIRA, 2016).

Os processos Oxidativos Avançados vêm se tornando uma alternativa importante para o tratamento desses resíduos. Essa técnica se destaca de outras devido a eficiência atingida e o baixo tempo para tratamento. Além disso, a formação de resíduo é quase inexistente se comparado a outras técnicas de tratamento (DE MORAIS, J. L.; PERALTA-ZAMORA, P., apud FIOREZE; SANTOS; SCHMACHTENBERG, 2014).

A técnica baseia-se na geração de radicais hidroxilas ( $OH\cdot$ ) que possuem elevado poder oxidante. Esses radicais atuam na oxidação de compostos químicos e orgânicos, podendo mineralizar compostos complexos. Os principais agentes oxidantes utilizados nesse processo são o oxigênio, cloro, peróxido de hidrogênio entre outros, os quais visam degradar compostos e, conseqüentemente, reduzir a DQO (CASTRO, J. P.; FARIA, P., 2001; GUIMARAES, J. R., 2013 apud MOREIRA; MOREIRA, 2016;

MARTINS et al., 2011).

Entre as ramificações dos POAs, o reagente Fenton é um dos mais utilizados por ser simples e possuir boa reatividade. É constituído da reação entre peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) catalisado pelo íon  $Fe^{+2}$ , com a geração do radical hidroxila, conforme Equação 1 (SILVA, C. E. et al., 2006).



Para a aplicação dos POAs normalmente é realizado uma combinação de processos a fim de melhorar a eficiência. A técnica de coagulação e floculação é uma combinação utilizada em larga escala, visto que, através da aglutinação de flocos, oferecem a clarificação para o efluente (MARTINS, 2014).

Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a eficiência dos POAs com a utilização do agente oxidante peróxido de hidrogênio e do reagente fenton através de resíduos gerados no laboratório de ensino de química. A eficácia será avaliada através da redução da DQO, além de análise de parâmetros como turbidez e condutividade do resíduo.

## 2 | METODOLOGIA

Utilizou-se, para o teste, os resíduos inorgânicos gerados nas aulas práticas dos laboratórios de ensino de química da Unochapecó. Deixou-se sedimentar, por gravidade, e utilizou-se somente o líquido sobrenadante para as análises em duplicata. Para a realização do procedimento, primeiramente foi ajustado o pH de 0,4 para 3,8, adicionando uma solução de NaOH de 1 M.

Foram realizados dois testes: um somente com a adição de 0,5 ml de peróxido de hidrogênio 35 %, e outro com 1 ml de reagente Fenton, ou seja, 0,5 ml de peróxido de hidrogênio 35 % com 0,5 ml de sulfato ferroso, para 500 ml de amostra em ambos os testes. Deixou-se reagir por 24 horas. Posteriormente, fez-se a coagulação e floculação com 1 ml de solução de cloreto férrico 0,18 M. O processo de agitação foi realizado primeiramente em 150 rpm por 30 segundos e, posteriormente, 30 minutos em 20 rpm. Após esse processo, a amostra permaneceu 24 horas em repouso. Após a realização dos procedimentos, foram realizadas análises de turbidez, condutividade e DQO.

Para a análise de DQO, aplicou-se a metodologia padrão do refluxo aberto (APHA, 1998), utilizou-se um balão de fundo chato (500 ml), sendo adicionado 1 g de sulfato de mercúrio ( $Hg_2SO_4$ ) e uma porção de pérolas de vidro. Inseriu-se 25 ml de solução de ácido sulfúrico com sulfato de prata ( $H_2SO_4 / Ag_2SO_4$ ), e em seguida 25 ml de solução de dicromato de potássio ( $K_2Cr_2O_7$ ) 0,25 N. Posteriormente, transferiu-se 50 ml da amostra para o balão, sendo que estas foram diluídas em 1:100, para que pudesse ser realizado o processo. Adicionou-se mais 50 ml de  $H_2SO_4 / Ag_2SO_4$  e homogeneizou-se.

Conectou-se o balão no condensador de refluxo, conforme a Figura 1, onde a amostra permaneceu em aquecimento por duas horas. O procedimento foi realizado

para todos os testes, bem como para o bruto e o branco, todos em duplicata. Após o término das duas horas, adicionou-se 150 ml de água destilada, e então, foram deixadas em repouso até atingir a temperatura ambiente.



Figura 1 – Técnica de DQO em refluxo aberto

Fonte: Elaboração dos autores

Posteriormente, foram adicionadas 6 gotas de solução indicadora Ferroin. Para realizar a titulação, conforme a Figura 2, adicionou-se uma solução de sulfato ferroso amoniacal (SFA) 0,25 N em uma bureta de 25 ml. Então, titulou-se as amostras com auxílio de agitador magnético, até a viragem do verde azulado para o marrom. Para quantificar a DQO, anota-se o volume gasto na titulação e realiza-se o cálculo com a Equação 2.



Figura 2 – Titulação para determinação da DQO

Fonte: Elaboração dos autores

$$DQO = \frac{(A - B) \times N_{SFA} \times 8000}{ml \text{ de amostra}}$$

Equação 2

Onde:

A: ml SFA gastos no branco;

B: ml SFA gastos na amostra;

$N_{SFA}$ : normalidade real do SFA.

Para as análises de pH e condutividade foi utilizado um pHmetro e para a turbidez foi utilizado um turbidímetro.

### 3 | RESULTADOS OBTIDOS

Primeiramente, fez-se análises de pH, turbidez, condutividade e DQO do resíduo bruto, a fim de caracterizá-lo para acompanhar a redução dos seus parâmetros com o tratamento. Os dados encontrados estão dispostos na Tabela 1.

Resíduo Bruto	
<b>pH</b>	0,4
<b>Turbidez (NTU)</b>	25,95
<b>Condutividade (mV)</b>	354,5
<b>DQO (mg O<sub>2</sub>/L)</b>	44 580

Tabela 1 – Características do resíduo bruto

Para o primeiro teste, adicionou-se somente o peróxido de hidrogênio 35% no resíduo com e sem ajuste de pH. O método de tratamento seguiu o descrito na metodologia. Posteriormente, foram feitas as análises para verificar a eficiência do teste. Os dados encontrados estão descritos na Tabela 2.

	Peróxido de hidrogênio		Bruto
<b>pH inicial</b>	<b>0,4</b>	<b>3,8</b>	<b>0,4</b>
<b>pH final</b>	0,42	3,72	0,405
<b>Turbidez (NTU)</b>	53,55	84,9	25,95
<b>Condutividade (mV)</b>	353,9	176,45	354,5
<b>DQO (mgO<sub>2</sub>/L)</b>	44 000	15 400	44 580
<b>Eficiência % (DQO)</b>	1,3	65,46	-

Tabela 2 – Características das amostras tratadas com peróxido de hidrogênio e do resíduo bruto

Nota-se através dos resultados obtidos que a técnica, somente com a adição do peróxido, é eficiente apenas para o pH de 3,8. Esse resultado está de acordo com a literatura, pois segundo Domènech et al. (2001) apud Martins et al. (2011), em um meio com excesso de OH<sup>-</sup> e altas concentrações de peróxido de hidrogênio, os mesmos tendem a competir e criam efeitos inibitórios para a degradação.

Para o pH de 3,8, a eficiência se mostrou altamente significativa, ou seja, 65,46 %

de remoção de DQO. A condutividade reduziu cerca de 49,80 % e a turbidez aumentou, porém não significativamente.

Já para o teste 2, foi adicionado o reagente fenton, ou seja, peróxido de hidrogênio e sulfato ferroso. Também foi seguido os passos descritos na metodologia. Os dados encontrados após a realização das análises, estão descritos na Tabela 3.

	Fenton		Bruto
<b>pH inicial</b>	<b>0,4</b>	<b>3,8</b>	<b>0,4</b>
<b>pH final</b>	0,403	3,74	0,405
<b>Turbidez (NTU)</b>	60,05	75,5	25,95
<b>Condutividade (mV)</b>	354,9	175,2	354,5
<b>DQO (mg O<sub>2</sub>/L)</b>	28 900	24 900	44 580
<b>Eficiência % (DQO)</b>	35,17	44,15	-

Tabela 3 – Características das amostras tratadas com reagente fenton e do resíduo bruto

O teste realizado com o reagente fenton, apresentou significativa redução de DQO nos dois pH's, sendo mais eficiente no pH 3,8, com 44,15 % de remoção. Também está de acordo com a literatura, visto que a mesma evidencia que a melhor faixa de pH para utilizar o reagente fenton é de 3 a 5 (ARIS, A. SHARRATT, P. N., 2005 apud MOREIRA; MOREIRA, 2016).

O parâmetro turbidez seguiu o mesmo do teste anterior, aumentando, porém não significativamente. A condutividade, no pH de 3,8, diminuiu 49 %, sendo que para o pH de 0,4 não variou.

#### 4 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Analisando os resultados obtidos pode-se concluir que, o método que apresenta maior eficiência na redução de DQO é com a adição de apenas peróxido de hidrogênio no pH de 3,8. Essa técnica apresentou uma remoção de 65,46 %, comprovando a eficiência da mesma. O tratamento com o reagente fenton também se mostrou satisfatório, porém menos significativo.

Com a adição de somente peróxido de hidrogênio além de um tratamento mais eficiente, apresenta baixa custo devido a utilizar somente um reagente. Além disso, não ocorre excesso de ferro, o qual pode gerar cor amarelado no resíduo.

#### 5 | AGRADECIMENTOS

Unochapecó, Governo do Estado de Santa Catarina (Bolsa Art 170).

#### REFERÊNCIAS

APHA. **Standard Methods for the examination of water and wastewater**. American Public Health Association, American Water Works Association, Water. 1998.

FIOREZE, Mariele; SANTOS, Eliane Pereira dos; SCHMACHTENBERG, Natana. PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS: FUNDAMENTOS E APLICAÇÃO AMBIENTAL. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, [s.l.], v. 18, n. 1, p.79-91, 7 abr. 2014. Universidad Federal de Santa Maria. <http://dx.doi.org/10.5902/2236117010662>.

FREIRE, Renato Sanches et al. NOVAS TENDÊNCIAS PARA O TRATAMENTO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS CONTENDO ESPÉCIES ORGANOCOLORADAS. **Química Nova**, [s.i.], v. 4, n. 23, p.504-511, 4 jan. 2000. Trimestral.

MARTINS, Hádél Camilo. **Estudo Sobre os Processos de Coagulação, Floculação e Decantação em Efluentes Oriundos de Usina Canavieira**. 2014. 62 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná Câmpus Londrina, Londrina, 2014.

MARTINS, Leonardo Madeira et al. Aplicação de Fenton, foto-Fenton e UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> no tratamento de efluente têxtil sintético contendo o corante Preto Biozol UC. **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 3, n. 16, p.261-270, 28 abr. 2011. Semestral.

MOREIRA, Marcos Vinicius de Oliveira; MOREIRA, Mauro de Paula. Aplicação do Reagente de Fenton como Técnica Avançada para o Tratamento de Água. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v. 18, n. 2, p.256-268, 2016. GN1 Genesis Network. <http://dx.doi.org/10.5935/recen.2016.02.05>.

SILVA, C. E. et al. Aplicação dos Processos Fenton e Foto-Fenton no Tratamento de Percolados de Aterros Sanitários. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, XVI, 2006, Santos. **Anais...** Santos: 2006. 8 p.

## ESTUDO DA REAÇÃO DE ELETRO-OXIDAÇÃO DE GLICEROL EM MEIO ALCALINO

**Micaeli Caldas Gloria**

Universidade Federal do Amazonas  
Itacoatiara – Amazonas

**Elson Almeida de Souza**

Universidade Federal do Amazonas  
Itacoatiara – Amazonas

**Paulo José de Sousa Maia**

Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Macaé – Rio de Janeiro

**RESUMO:** Entre os diferentes tipos de células a combustível (CaC's), o interesse por aquelas que usam álcoois tem aumentado nos últimos tempos, colocando estes sistemas na lista dos renováveis. O glicerol é um líquido inodoro, possui alta viscosidade e alto valor energético quando comparado a outras fontes de combustível utilizadas nas CaC's, e por isso, este álcool é objeto de nosso estudo na aplicação em células a combustível de álcool direto. Este trabalho trata do estudo eletroquímico da reação de eletro-oxidação do glicerol em PtSnRh/C em meio alcalino. Os eletrocatalisadores  $Pt_5Sn_4Rh_1/C$ ,  $Pt_3Sn_1Rh_1/C$  e PtSn/C foram preparados pelo método de redução por álcool (MRA) e caracterizados eletroquimicamente por meios das técnicas de voltametria cíclica e cronoamperometria em meio básico (KOH) na presença do álcool. Os

ensaios eletroquímicos de voltametria cíclica mostraram que os catalisadores são eficientes, tendo os catalisadores ternários uma efetiva eletro-oxidação de glicerol pois apresentaram maiores picos de densidade de corrente e baixos potenciais de início de oxidação do álcool, indicando bom desempenho catalítico. Os testes cronoamperométricos mostraram boa atividade catalítica para os eletrocatalisadores ternários a 0,6 V, apresentando densidade de corrente quase estacionária a 1200 s. O aumento na concentração do álcool proporcionou um aumento na densidade de corrente apenas para  $Pt_5Sn_4Rh_1/C$ , enquanto  $Pt_3Sn_1Rh_1/C$  apresentou maior densidade de corrente para maior concentração apenas nos primeiros segundo de teste.

**PALAVRAS-CHAVE:** Célula a combustível, glicerol, catalisador.

**ABSTRACT:** Among the different types of fuel cells, CaC's, the interest in those using alcohols has increased in recent times, putting these systems on the list of renewables. Glycerol is an odorless liquid, has high viscosity and high energy value when compared to other sources of fuel used in the CaC's, and therefore, this alcohol is the object of our study in the application in fuel cells of direct alcohol. This work deals with the electrochemical study of the electro-oxidation reaction of glycerol in PtSnRh/C in alkaline

medium. The electrocatalysts  $\text{Pt}_5\text{Sn}_4\text{Rh}_1/\text{C}$ ,  $\text{Pt}_3\text{Sn}_1\text{Rh}_1/\text{C}$  and  $\text{PtSn}/\text{C}$  were prepared by the alcohol reduction method (MRA) and electrochemically characterized by means of cyclic voltammetry and chronoamperometry techniques in basic medium (KOH) in the presence of alcohol. The electrochemical tests of cyclic voltammetry showed that the catalysts are efficient, with the ternary catalysts having an effective electro-oxidation of glycerol, since they showed higher current density peaks and low potential of oxidation initiation of the alcohol, indicating good catalytic performance. The chronoamperometric tests showed good catalytic activity for the ternary electrocatalysts at 0.6 v, showing almost stationary current density at 1200 s. The increase in the alcohol concentration provided an increase in current density only for  $\text{Pt}_5\text{Sn}_4\text{Rh}_1/\text{C}$ , while  $\text{Pt}_3\text{Sn}_1\text{Rh}_1/\text{C}$  showed higher current density for higher concentration only in the first second of test

**KEYWORDS:** Fuel cells, glycerol, catalysts.

## 1 | INTRODUÇÃO

Atualmente, a principal fonte de energia vem dos combustíveis fósseis, os quais, são utilizados em caldeiras industriais e máquinas térmicas, porém, esses combustíveis não são renováveis e produzem grandes quantidades de poluentes, como por exemplo, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ) e hidrocarbonetos, gerados pelo processo de combustão incompleta do combustível. Estes, além de serem altamente prejudiciais à saúde, são os responsáveis por efeitos atmosféricos negativos, tais como a chuva ácida e o efeito estufa (SOUZA, 2009; VILLULLAS; TICIANELLI; GONZALEZ, 2002). O  $\text{CO}_2$  é na maioria das vezes produzido por setores automobilísticos e pelas indústrias que fazem uso de combustíveis fósseis, e uma possível solução para esse problema, seria a troca por combustíveis não poluentes. Entretanto, essa solução apresenta um elevado custo de entrada no mercado (VARELA JUNIOR, 2006 e TICIANELLI; GONZALEZ, 1989).

Nesse contexto, uma nova tecnologia que vem despertando interesse a nível internacional, é a utilização de células a combustível (CaC), onde esta, por sua vez, visa a diminuição dos poluentes atmosféricos e por isso, esses dispositivos estão entre as opções mais favoráveis na redução do consumo de energia gerada através de combustíveis fósseis. Vale ressaltar, que as CaC's são dispositivos conversores de energia química em elétrica, e por essa razão, não se pode pensar na substituição das fontes geradoras de energia existentes, tais como, eólica, geotérmica e solar. Logo, o que se pode fazer, é compará-las em termos de produção de energia limpa. Por esse motivo, as células a combustível vêm ganhando espaço no mercado mundial com aplicações estacionárias, móveis e portáteis, como fonte de energia elétrica sem danificar o meio ambiente, o que as têm tornado como uma das alternativas mais promissoras (TICIANELLI; CAMARA; SANTOS, 2005; SARON, 2007 e WENDT;

LINARDI; ARICÓ, 2002).

Uma célula a combustível ideal utiliza como combustível o hidrogênio, contudo, há uma grande dificuldade no processo de armazenamento e transporte deste, dificultando assim, o seu uso. Desse modo, tem-se desenvolvido pesquisas relacionadas às células a combustível de álcool direto – DAFC (do inglês, Direct Alcohol Fuel Cell) a fim de substituir o hidrogênio por novos combustíveis como por exemplo, metanol, etanol, etilenoglicol e glicerol, sendo que para o metanol há um maior destaque, visto que, ele tem sido considerado um bom combustível para as células, devido a sua fácil manipulação em comparação ao hidrogênio, contudo, este é altamente volátil e tóxico (SILVA; DORÇA; CAMACHO, 2007). Diante disso, surge o interesse em álcoois com altas densidades energéticas, baixos pesos moleculares, não tóxicos, com baixa volatilidade e não inflamáveis. Assim, o álcool que melhor se encaixa nessas condições é o glicerol, e este por sua vez, é um subproduto gerado a partir do biodiesel. O nome sistemático do glicerol segundo a União Internacional de Química Pura e Aplicada (IUPAC), é propano-1,2,3-triol, este, é um poliálcool com três grupos hidroxilas presentes em sua estrutura. Seu nome provém da palavra grega *glykys*, que significa doce. É um líquido incolor e viscoso, e deriva da petroquímica ou de fontes naturais (BEATRIZ; ARAÚJO; LIMA, 2011).

O glicerol apresenta inúmeras utilidades tanto na indústria farmacêutica quanto na alimentícia, e entre outras, contudo, o volume produzido é superior ao absorvido pelo mercado. Assim, há uma grande preocupação na forma em como ele é descartado na natureza, uma vez que, no Brasil não há leis específicas para esse fim. Com o intuito de evitar problemas ocasionados na superprodução de glicerol, diversas aplicações vêm sendo desenvolvidas (BORTOLOTTI, 2016). O uso do glicerol como possível combustível em uma célula, é uma aplicação promissora e lucrativa quando associada a sua obtenção excessiva como subproduto na geração do biodiesel a uma alta e limpa produção energética, uma vez que, a demanda de energia atual cresce rapidamente junto com o avanço tecnológico e o crescimento populacional. Assim, este trabalho tem como objetivo o estudo de novas fontes de energia e com o foco em células a combustível, utilizando técnicas eletroquímicas a fim de testar a eficiência de catalisadores a base de platina frente a eletro-oxidação de glicerol em meio alcalino para possível aplicação em célula a combustível, com a finalidade de gerar energia mais eficiente e limpa para a população de forma alternativa (GONÇALVES; PEREZ; ÂNGELO, 2009).

## 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Células a Combustível

As células a combustível (CaC's), são dispositivos capazes de converter a energia química diretamente em energia elétrica através de sistemas eletroquímicos

diante de inúmeras quantidades de combustíveis, sendo um método bastante eficiente na geração de eletricidade e, em alguns casos, de calor (TICIANELLI; GONZALEZ, 1989, MEDEIROS *et al.*, 2007). As CaC's são conversores eficientes de energia e para isso, faz-se necessário o uso de uma fonte energética que provém de um combustível, o qual, é o que impulsiona para o funcionamento da célula.

A reação que ocorre na célula é uma reação de combustão, onde um combustível é oxidado e o oxigênio do ar, é reduzido. Na célula, o combustível é oxidado em um dos eletrodos, o ânodo, enquanto que no outro, o cátodo, ocorre a redução de oxigênio. A reação atinge seu ápice com a circulação dos elétrons no circuito externo, onde o trabalho elétrico é realizado (TICIANELLI; GONZALEZ, 2005).

A estrutura física de uma célula a combustível é descrita como sendo composta por dois eletrodos (condutores eletrônicos), sendo um positivo, cátodo, e outro negativo, denominado ânodo, os quais são separados por um eletrólito (condutores iônicos), onde este irá transportar os íons. Uma vez que os eletrodos são supridos com os gases reagentes, aparece uma diferença de potencial entre estes, que em circuito aberto resulta da ordem de 1,0 V. A este sistema eletroquímico, dá-se o nome de célula unitária (TICIANELLI; GONZALEZ, 2005, TICIANELLI; GONZALEZ, 1989).

Os eletrodos empregados nas células a combustível são chamados de eletrodos de difusão a gás, e estes são colocados de forma a separar o eletrólito dos reagentes gasosos na célula. Os eletrodos de difusão a gás são condutores eletrônicos permeáveis aos gases reagentes e são separados um do outro pelo eletrólito a fim de que os gases não se misturem. O eletrólito pode ser líquido, um polímero condutor de cátions, saturado com líquido, ou um sólido (óxido de zircônio) (WENDT; GOTZ; LINARDI, 2000).

Referindo-se ao interesse prático, o único combustível que permite obter densidades de corrente elétrica adequadas no estágio atual de desenvolvimento da tecnologia, é o hidrogênio, embora já existam células que utilizam metanol como combustível, porém, as densidades de correntes são relativamente baixas. Desse modo, o procedimento mais viável é submeter o combustível a uma reforma a vapor para se obter o hidrogênio que é introduzido na célula. Em uma célula onde o hidrogênio atua como combustível e o oxigênio como oxidante, é possível obter como produto final eletricidade, calor e água, como ocorre nas reações a seguir:



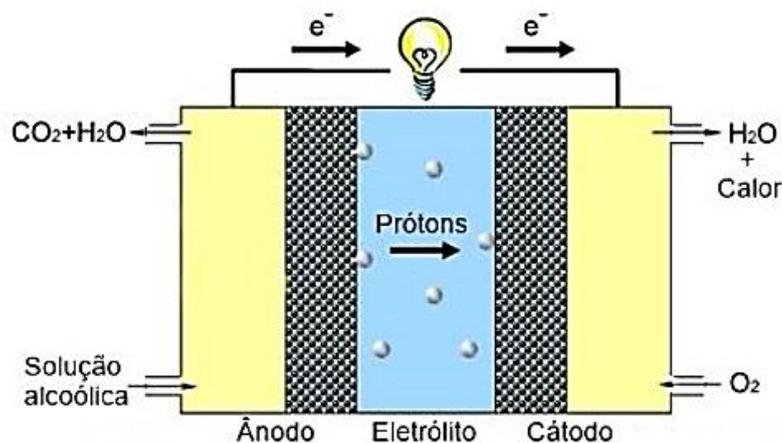
Uma célula a combustível ideal utiliza como combustível o gás hidrogênio, porém, o seu processo de armazenamento e transporte acabam dificultando o seu uso, além de haver a necessidade de produzi-lo, devido este não ser um combustível primário, configurando-se assim, como um vetor energético (CÂNDIDO *et al.*, 2013;

## 2.2 Células a Combustível de Álcool Direto (DAFC)

Entre os diferentes tipos de células existentes, nos últimos tempos, um interesse crescente tem surgido quanto ao desenvolvimento de células que utilizam combustíveis líquidos, principalmente álcoois que colocam estes sistemas na lista dos ditos renováveis. Dentre os possíveis álcoois, metanol, etanol, etilenoglicol e glicerol, estudos vêm sendo realizados, visando a aplicação direta em células a combustível de álcool direto (DAFC – do inglês, Direct Alcohol Fuel Cell) (SAROM, 2007).

As células a combustível de álcool direto (DAFC), são células que promovem a oxidação direta do combustível sem haver a necessidade de reforma. Quando comparadas às células que utilizam diretamente hidrogênio gasoso, as DAFC's apresentam algumas vantagens, dentre elas, destacam-se o menor custo, a fácil manipulação do combustível, além de gerarem mais elétrons na oxidação completa do álcool que o hidrogênio (ARAÚJO, 2015).

Nas DAFC's o álcool utilizado é inserido diretamente no ânodo do dispositivo, e a partir da reação de oxidação são produzidos elétrons e prótons. Contudo, as células alimentadas com álcoois produzem dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) no ânodo do dispositivo, e vários outros subprodutos dependendo da espécie alcoólica, enquanto que no cátodo, ocorre a formação de água e calor, conforme a Figura 1 (SILVA; DORÇA; CAMACHO, 2007).



**Figura 1:** Esquema geral do funcionamento de uma célula a combustível alimentada diretamente com álcool.

Fonte: ARAÚJO, 2015

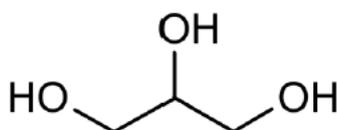
Do ponto de vista tecnológico, as reações de oxidação dos álcoois têm sido de grande importância para o desenvolvimento das células a combustível e isso tem levado à procura por novos combustíveis líquidos tais como, metanol, etanol, etilenoglicol e glicerol, dentre estes, há um maior destaque para o metanol, sendo considerado um bom combustível para essas células, uma vez que, é comercialmente barato, pode ser

oxidado facilmente e é de fácil manipulação em comparação ao hidrogênio, contudo, seu uso nessas células é limitado, devido a sua alta inflamabilidade e toxicidade (BERMANN, 2008), além de produzir uma quantidade elevada de monóxido de carbono (CO) durante a oxidação, o que acarreta na diminuição da eficiência da célula, uma vez que, este pode se adsorver na superfície do catalisador (LIMA, 2015).

Pesquisas voltadas para geração de energia renováveis a partir de álcoois com altas densidades energéticas, baixos pesos moleculares, como por exemplo, etanol, metanol, etilenoglicol, e mais recentemente, o glicerol no estudo de eletrocatalise, vem aumentando cada vez mais, visto que, pode atuar como uma via de colaboração em uma conversão de energia mais eficiente e menos poluidora.

### 2.3 Célula a combustível de glicerol direto (DGFC)

O termo glicerol geralmente aplica-se somente ao componente químico puro (1,2,3-propanotriol) de fórmula molecular  $C_3H_8O_3$ , o qual, é um líquido que não tem cheiro, apresenta uma densidade de  $5 \text{ kWhKg}^{-1}$  e caracteriza-se com uma alta viscosidade. Em sua estrutura, um grupo hidroxila é ligado a cada um dos três carbonos presentes na molécula, como mostra a Figura 2 (PEITER *et al.*, 2016).



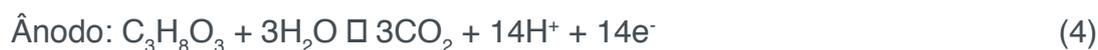
**Figura 2:** Fórmula estrutural do glicerol.

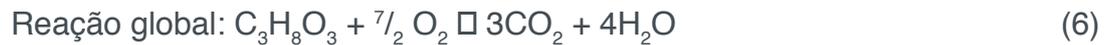
Fonte: BORTOLOTTI, 2016

O glicerol é um álcool que tem uma alta densidade de energia quando comparado a outros combustíveis utilizados como, metanol e o etanol, e é um subproduto da produção de biodiesel, onde, para cada três mols de biodiesel, produz-se um mol de glicerol, sendo que a partir desta regra de conversão, pode-se estimar a dimensão do aumento da produção de glicerol.

O uso deste álcool como combustível, tem despertado o interesse em muitas pesquisas de eletrocatalise, pois apresenta algumas vantagens em relação a outros álcoois, como por exemplo, elevado ponto de ebulição ( $290 \text{ }^\circ\text{C}$ ), o que faz com que diminua o seu risco de periculosidade diante de outros álcoois mais leves e apresenta uma densidade energética elevada, até  $5 \text{ kWhkg}^{-1}$ .

As reações que ocorrem nas células a combustível de glicerol direto (DGFC), são:





Por possuir baixa toxicidade e por ter em sua estrutura a presença de grupos hidroxilas em cada um dos carbonos da cadeia, a possibilidade de oxidação parcial de cada um deles é grande, podendo ser obtido 10 dos 14 elétrons que estão disponíveis na molécula. Neste âmbito, os fatores de baixa toxicidade, seu alto potencial energético e sua elevada obtenção a baixos custos, fazem com que o glicerol se torne uma alternativa aos demais álcoois com aplicação em célula a combustível (BORTOLOTTI, 2016; JUNIOR, 2015).

O glicerol quando completamente oxidado libera 14 elétrons por molécula. Este álcool dispõe de uma vasta aplicação, tanto na indústria farmacêutica, alimentícia e cosmética, contudo, essas indústrias que gerenciam a produção de glicerol obtido a partir do biodiesel, não estão conseguindo absorver sua quantidade excessiva produzida, de forma que este era descartado de maneira incorreta na natureza (ARAÚJO, 2015).

Uma das dificuldades encontradas na oxidação do glicerol em ambos os casos é a ruptura das ligações C-C da molécula, o que resulta na formação de intermediários gerados a partir da oxidação incompleta do álcool (GONÇALVES, 2010). Assim, se tornou de grande importância o desenvolvimento de rotas alternativas para o aproveitamento do glicerol, onde um extenso número de produtos pode ser gerado devido a quantidade de grupos hidroxilas (OH) presentes na molécula (ARAÚJO, 2015). Esse esquema de rotas pode ser observado na Figura 3.

Em meios alcalinos são oxidados preferencialmente grupos alcoólicos primários, e o ácido glicérico é obtido em maior quantidade, enquanto que em condições ácidas formam-se particularmente grupos alcoólicos secundários, como a dihidroxiacetona e ácido hidróxipirúvico, por exemplo. Outra espécie que surge como intermediário devido às etapas de oxidação incompleta da molécula de glicerol é o monóxido de carbono (CO). Este quando adsorvido de forma irreversível sobre os sítios superficiais de catalisadores, como por exemplo a platina, compromete a eficiência catalítica e o rendimento dos mesmos (GONÇALVES, 2010; SIMÕES; BARANTON; COUTANCEAU, 2010).

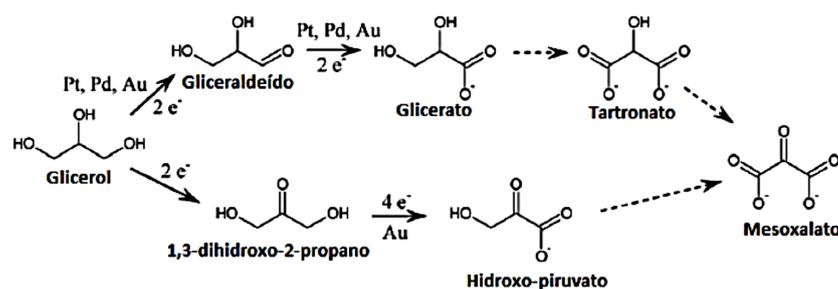


Figura 3: Mecanismo de eletro-oxidação do glicerol.

Fonte: SIMÕES *et al.*, 2010

A platina é o principal catalisador utilizado tanto em meio ácido como em meio alcalino. Porém, esse metal apresenta um alto custo financeiro e o monóxido de carbono (CO) juntamente com outros resíduos orgânicos formados durante a dissociação das moléculas orgânicas alcoólicas, se adsorvem vigorosamente à superfície do catalisador, impedindo assim, a reação de prosseguir. Diante disso, estudos vêm sendo feitos com o intuito de aplicar novos catalisadores e diminuir o uso da platina em células a combustível, e para isso, existe a possibilidade de utilização de catalisadores bimetálicos, onde a platina vem sendo utilizada em conjunto com outros metais, geralmente menos nobres, tais como, Rh, Ru, Co, Sn, Ni, a fim de oxidar os resíduos a potenciais mais baixos (JUNIOR, 2015).

### 3 | METODOLOGIA

Inicialmente realizou-se o processo de lavagem das vidrarias, a qual, compõe-se de três etapas: banho em solução alcalina de permanganato de potássio; lavagem com solução ácida de peróxido de hidrogênio e em seguida, fervida em água purificada por no mínimo três vezes. O disco de ouro (usado como suporte) foi polido inicialmente com uma suspensão de alumina com diferentes granulometrias, 0,3 e 1,0 micron.

O disco foi colocado em um becker pequeno junto com acetona e levado ao banho ultrassom por aproximadamente 10 minutos. O mesmo procedimento ocorreu utilizando permanganato de potássio ( $\text{KMnO}_4$ ) no lugar da acetona. O disco foi então retirado do banho ultrassom e lavado com peróxido ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), e em seguida com água destilada quente para conclusão desta etapa.

Foram utilizados eletrocatalisadores à base de platina com razões atômicas de  $\text{Pt}_5\text{Sn}_4\text{Rh}_1/\text{C}$ ,  $\text{Pt}_3\text{Sn}_1\text{Rh}_1/\text{C}$  e  $\text{PtSn}/\text{C}$ , sendo este último para efeito de comparação, os quais, foram preparados através do Método de Redução por Álcool (MRA), onde este método consiste na presença dos metais ativos em uma suspensão contendo pó de carbono a partir da redução com álcool em refluxo, onde foi utilizado etilenoglicol como agente redutor. A mistura composta pelo pó de carbono (VULCAN XC-72R) e pelos sais dos metais ativos dispersos em solução de etilenoglicol:água, foi mantida em refluxo durante 3 h a temperatura de 130 °C. Ao fim do refluxo, o composto foi seco a temperatura de 80 °C, resultando assim nos eletrocatalisadores (SOUZA, 2009).

Para os testes eletroquímicos foram utilizadas as técnicas de Voltametria Cíclica (VC) e Cronoamperometria (CA) em uma célula eletroquímica de três eletrodos com entrada e saída de gás (Figura 4), utilizando um Potenciostato/Galvanostato – 302N Metrohm, onde este é acoplado a um computador.



**Figura 4:** Célula eletroquímica

**Fonte:** Autor, 2018

Os eletrodos foram conectados à célula eletroquímica, onde como contra-eletródo foi utilizado uma placa de platina, em seguida colocou-se o eletrodo de referência reversível de hidrogênio (ERH), e como eletrodo de trabalho utilizou-se um disco de ouro com  $0,78 \text{ cm}^2$  de área.

Os testes eletroquímicos foram realizados em meio alcalino, utilizando hidróxido de potássio como eletrólito suporte ( $\text{KOH } 0,5 \text{ mol.L}^{-1}$ ). Antes de executar a voltametria, retirou-se o oxigênio do eletrólito através da passagem de  $\text{N}_2$  pela solução por 10 minutos, aproximadamente.

Para a voltametria cíclica no eletrólito suporte, realizou-se uma varredura no disco de ouro sem a presença do catalisador na sua superfície para verificar a existência de impurezas através da técnica de voltametria cíclica. Os voltamogramas foram traçados em eletrólito de suporte ( $\text{KOH}$ ) contendo no intervalo de potencial 0,06 a 1,8 V e com velocidade de varredura em  $10 \text{ mV.s}^{-1}$  a temperatura ambiente. Posteriormente, foram realizadas VC's dos eletrodos com a camada catalisadora com velocidades de varreduras de  $10 \text{ mV.s}^{-1}$ , e utilizou-se uma janela de potencial de 0,06 – 1,1 V.

Para os testes com o eletrocatalisador foi preparada, uma suspensão contendo 2 mL de isopropanol e  $50 \mu\text{L}$  de Nafion® para cada grama de catalisador, onde colocou-se no banho ultrassom durante 10 min. Logo após, a solução com eletrocatalisador foi depositada sobre o disco de ouro (Au) com posterior evaporação de todo o solvente em temperatura ligeiramente acima da ambiente, ficando apenas o catalisador depositado na superfície do disco.

Para o efeito da concentração do álcool, foi realizado por voltametria cíclica (VC) e Cronoamperometria (CA) pela adição de Glicerol P.A. (Merck) sob concentrações de 0,1, 0,5, 1,0 e  $2,0 \text{ molL}^{-1}$  ao eletrólito suporte, em condições similares as citadas na voltametria no eletrólito suporte. A cronoamperometria foi realizada em potenciais fixos (600 mV) durante 20 min, onde, nessa etapa avaliou-se a atividade catalítica dos materiais utilizados.

## 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização eletroquímica

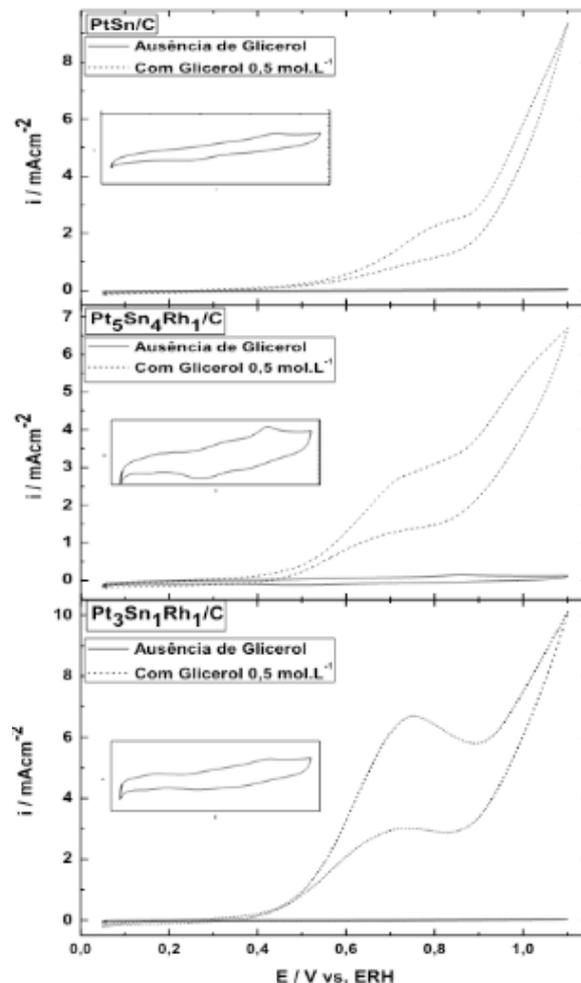
#### 4.1.1 Voltametria cíclica

A atividade catalítica dos eletrocatalisadores foi estudada em eletrólito alcalino, KOH 0,5 mol.L<sup>-1</sup>, por meio de voltametria cíclica, a qual, é uma técnica analítica que tem por objetivo analisar dados qualitativos e quantitativos na superfície do eletrodo de trabalho de uma espécie química eletroativa, a partir de uma relação entre corrente versus potencial, por meio de eletrólise realizada em uma célula com dois ou três eletrodos. A partir dessa técnica, foi possível observar a presença de processos de óxido-redução, adsorção da espécie eletroativa e a reversibilidade das reações na superfície do eletrodo (COUTINHO, 2017).

No Gráfico 1 são apresentados os voltamogramas cíclicos na presença e ausência de glicerol 0,5 mol.L<sup>-1</sup>, em intervalos de potencial de 0,06 a 1,1 V vs. ERH, a velocidade de varredura de 10 mV.s<sup>-1</sup>. No voltamograma com a ausência do combustível (melhor observado na inserção), observa-se que entre os intervalos de potenciais de 0,05 a 0,4 V, a região de hidrogênio é pouco definida, devido estar relacionada com a oxidação do hidrogênio adsorvido na varredura catódica e anódica, conforme reações 7 e 8. Esse processo está relacionado também à formação de óxidos em potenciais mais baixos que modificam as correntes obtidas no decorrer da varredura, característica aplicada a materiais que contém platina (WANG, 2013).



Observa-se no Gráfico 1 que na região entre os intervalos de potenciais 0,05 a 0,4 V vs. ERH a densidade de corrente se mantém constante devido não apresentar a região de adsorção e dessorção de hidrogênio, um vez que o glicerol por ser um poliálcool se adsorve em potenciais mais baixos em eletrodos contendo platina, inibindo essa região (GONÇALVES, 2010). É possível observar que no potencial de 0,5 V, todos os catalisadores já apresentam densidade de corrente de oxidação do álcool, porém, para ambos os ternários nota-se que a oxidação é antecipada e ocorre a 0,35 V em relação ao catalisador binário que apresentou potencial de oxidação em 0,45 V.



**Gráfico 1:** Voltamogramas cíclicos de PtSn/C, Pt<sub>5</sub>Sn<sub>4</sub>Rh<sub>1</sub>/C e Pt<sub>3</sub>Sn<sub>1</sub>Rh<sub>1</sub>/C em KOH 0,5 mol.L<sup>-1</sup>, na presença de Glicerol 0,5 mol.L<sup>-1</sup>, velocidade de varredura 10 mVs<sup>-1</sup>, em temperatura ambiente

Isso ocorre devido os metais adicionados à platina favorecerem a adsorção de espécies oxigenadas facilitando a oxidação de espécies intermediárias, como por exemplo o CO a CO<sub>2</sub> (GOMES *et al.*, 2013). Entre os potenciais de 0,6 a 0,9 V, observa-se a formação do primeiro pico, o qual, corresponde a oxidação inicial de moléculas de glicerol adsorvidas sobre a superfície catalítica, apresentando um máximo de densidade de corrente de 2,25 mAcm<sup>-2</sup> para Pt<sub>5</sub>Sn<sub>4</sub>Rh<sub>1</sub>/C e 7 mAcm<sup>-2</sup> para Pt<sub>3</sub>Sn<sub>1</sub>Rh<sub>1</sub>/C.

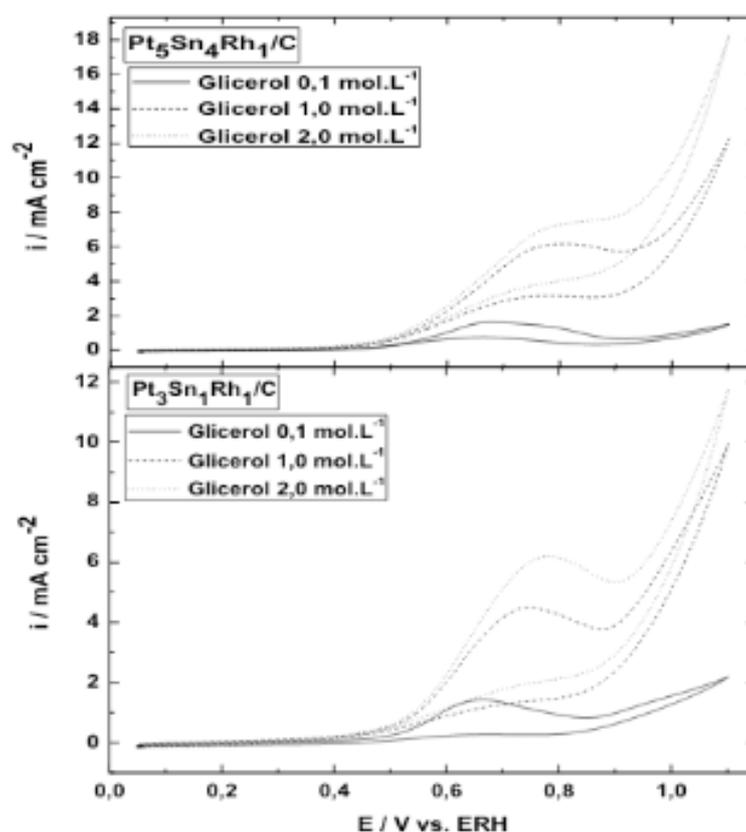
Após atingir o máximo de corrente, onde começam a aparecer as espécies adsorvidas, observa-se uma pequena queda de corrente e a formação do segundo pico anódico bem definido (melhor observado para Pt<sub>3</sub>Sn<sub>1</sub>Rh<sub>1</sub>/C), entre os potenciais de 0,9 a 1,1 V. A varredura catódica atribui-se à oxidação de produtos intermediários resultante da oxidação incompleta do glicerol e pode ocorrer mais lentamente, devido essa velocidade de reação de álcoois com mais de um carbono ser determinada pela clivagem das ligações C – C, visto que, os intermediários são adsorvidos nos sítios ativos do catalisador e competem com o glicerol bloqueando a parte cataliticamente ativa, onde, no meio alcalino são formados como produtos principais da oxidação, gliceraldeído, dihidroxiacetona, ácido glicólico e ácido oxálico (NUNES, 2012; SILVA,

2013).

A quebra dessas ligações é favorecida com a combinação da Pt com um segundo ou terceiro metal, sendo utilizado neste caso, Sn e Rh, onde, observa-se que a introdução do Sn na estrutura cristalina da Pt, provoca melhora na atividade catalítica, e o Rh por sua vez, facilita a quebra das ligações de carbono, enquanto que o CO formado como produto reacional intermediário durante a clivagem das ligações C–C se adsorve mais fracamente e é oxidado a  $\text{CO}_2$  (SANTOS, 2015).

Para avaliar a eficiência de um catalisador, analisa-se o potencial de início de oxidação do álcool e o máximo de densidade de corrente. Quanto mais baixo for o potencial de oxidação e maior o valor da densidade de corrente do pico anódico mais eficiente será o catalisador, contudo, altos valores de densidade de corrente não significa que o catalisador será seletivo para formação de  $\text{CO}_2$ , uma vez que, há a formação de espécies menos oxidadas (GOMES; TREMILIOSI-FILHO, 2011). Assim, observa-se que a antecipação do potencial de oxidação e a elevação na densidade de corrente, aumenta a atividade catalítica, que é beneficiada pela combinação dos três metais em comparação ao catalisador binário. A fim de encontrar a melhor concentração para a eletro-oxidação de glicerol e possível aplicação no sistema de célula a combustível, realizou-se testes para avaliar o efeito da concentração do álcool.

Conforme observado no Gráfico 2 onde são apresentados voltamogramas cíclicos para eletrocatalisadores ternários em diferentes concentrações de glicerol na presença de eletrólito suporte  $\text{KOH } 0,5 \text{ mol.L}^{-1}$  a velocidade de varredura de  $10 \text{ mVs}^{-1}$ .

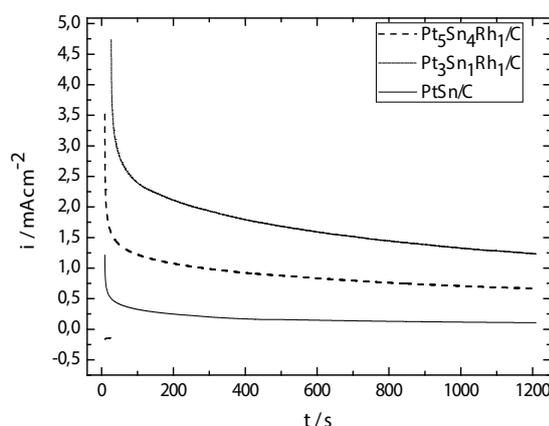


**Gráfico 2:** Voltamogramas cíclicos de  $\text{Pt}_5\text{Sn}_4\text{Rh}_1/\text{C}$ ,  $\text{Pt}_3\text{Sn}_1\text{Rh}_1/\text{C}$  em  $\text{KOH } 0,5 \text{ mol.L}^{-1}$ , na presença de Glicerol 0,1, 1,0 e  $2,0 \text{ mol.L}^{-1}$ , velocidade de varredura  $10 \text{ mVs}^{-1}$ , em temperatura ambiente

Os resultados obtidos apresentaram perfis característicos da oxidação do álcool. Considerando toda a varredura positiva no voltamograma cíclico, observa-se que conforme a concentração de glicerol aumenta é possível observar para ambos os catalisadores, que o aumento das densidades de correntes foram proporcionais ao aumento das concentrações do álcool, 0,1, 1,0 e 2,0 mol.L<sup>-1</sup>, atingindo uma densidade corrente máxima em 18 mAcm<sup>-2</sup> para Pt<sub>5</sub>Sn<sub>4</sub>Rh<sub>1</sub>/C e em 12 mAcm<sup>-2</sup> para Pt<sub>3</sub>Sn<sub>1</sub>Rh<sub>1</sub>/C na concentração de 2 mol.L<sup>-1</sup>.

## 4.2 Cronoamperometria

Por meio da técnica de Cronoamperometria, a qual, mostra a estabilidade durante o processo reacional, onde se fixa o valor do potencial com o intuito de se observar o comportamento da corrente em função do tempo, foi avaliada a atividade e estabilidade do catalisador. Nos testes, foi aplicado o potencial de 0,6 V durante tempo de 1200 s. No Gráfico 3 estão apresentados os perfis de decaimento cronoamperométrico para os eletrocatalisadores Pt<sub>5</sub>Sn<sub>4</sub>Rh<sub>1</sub>/C, Pt<sub>3</sub>Sn<sub>1</sub>Rh<sub>1</sub>/C e PtSn/C na concentração de 0,5 mol.L<sup>-1</sup> de eletrólito e glicerol.



**Gráfico 3:** Curvas amperométricas de Pt<sub>5</sub>Sn<sub>4</sub>Rh<sub>1</sub>/C, Pt<sub>3</sub>Sn<sub>1</sub>Rh<sub>1</sub>/C e PtSn/C em KOH 0,5 mol.L<sup>-1</sup>, na presença de Glicerol 0,5 mol.L<sup>-1</sup>, a 600 mV, tempo de 1200 s, em temperatura ambiente.

É possível observar que houve uma queda brusca na densidade de corrente para os catalisadores ternários e binários nos primeiros 50 s, havendo um decréscimo exponencial na densidade de corrente, essa queda de corrente pode ser relacionada ao recobrimento da superfície dos catalisadores por grupos OH<sub>ads</sub>/O<sub>ads</sub> a elevados potenciais. Outro fator que pode ser associado é à possível adsorção intensa de intermediários gerados no processo de eletro-oxidação do glicerol (BORTOLOTTI, 2016). Nas condições estudadas, os catalisadores apresentaram-se estáveis próximo de 20 min, apresentando densidades de correntes em ordem decrescente (Pt<sub>3</sub>Sn<sub>1</sub>Rh<sub>1</sub>/C > Pt<sub>5</sub>Sn<sub>4</sub>Rh<sub>1</sub>/C > PtSn/C), denotando assim maior atividade catalítica quando o estanho

e o ródio estão presentes no catalisador.

Na Tabela 1, encontram-se s valores da densidade de corrente dos catalisadores obtidos com variação na concentração do álcool em 0,1, 1,0 e 2,0 mol.L<sup>-1</sup>. Os eletrocatalisadores ternários apresentaram densidade de corrente quase- estacionárias no tempo 1200 s. Pt<sub>5</sub>Sn<sub>4</sub>Rh<sub>1</sub>/C apresentou aumento de densidade de corrente com o aumento da concentração do álcool, confirmando os dados voltamétricos para a variação da concentração. Enquanto que Pt<sub>3</sub>Sn<sub>1</sub>Rh<sub>1</sub>/C apresentou maior densidade de corrente (9,98 μA. cm<sup>-2</sup>) para a maior concentração do álcool nos primeiros segundos, mas que foi diminuindo ao longo do tempo, resultado em valor mais baixo a 1200 s (3,11 μA.cm<sup>-2</sup>).

Catalisador	Concentração do Álcool (mol.L <sup>-1</sup> )	Corrente (μAcm <sup>-2</sup> )
Pt <sub>5</sub> Sn <sub>4</sub> Rh <sub>1</sub> /C	0,1	3,48
	1,0	1,50
	2,0	4,99
Pt <sub>3</sub> Sn <sub>1</sub> Rh <sub>1</sub> /C	0,1	6,38
	1,0	4,39
	2,0	3,11

**Tabela 1:** Corrente obtida após 20 min em diferentes concentrações do álcool, 0,1, 1,0 e 2,0 mol.L<sup>-1</sup> em eletrólito básico KOH 0,5 mol.L<sup>-1</sup>.

## 5 | CONCLUSÃO

O estudo sobre a atividade catalítica dos eletrocatalisadores Pt<sub>5</sub>Sn<sub>4</sub>Rh<sub>1</sub>/C, Pt<sub>3</sub>Sn<sub>1</sub>Rh<sub>1</sub>/C e PtSn/C para aplicações em células a combustível de álcool direto mostrou-se significativo. Os testes eletroquímicos de voltametria cíclica realizados em meio alcalino mostraram boa atividade catalítica, tendo uma efetiva eletro-oxidação de glicerol para catalisadores ternários, pois apresentaram altas densidades de correntes e baixos potenciais de início de oxidação do glicerol, denotando assim, maior desempenho catalítico nas condições estudadas.

Os testes cronoamperométricos revelaram boa atividade catalítica para os eletrocatalisadores ternários a 0,6 V, apresentando densidade de correntes quase estacionárias a 1200 s. O aumento da concentração proporcionou o aumento da densidade de corrente somente para Pt<sub>5</sub>Sn<sub>4</sub>Rh<sub>1</sub>/C, enquanto Pt<sub>3</sub>Sn<sub>1</sub>Rh<sub>1</sub>/C apresentou maior densidade para maior concentração somente nos primeiros segundos de teste.

## REFERÊNCIAS

ARAÚJO, V. M. F. de. **Estudo da eletro-oxidação de glicerol sobre eletrocatalisadores ternários.** 2015. Dissertação (Mestrado em Química) – Programa de Pós graduação em Química, Universidade Federal do Amazonas, 104p.

BERMANN, B. **Crise ambiental e as energias renováveis.** Ciência e Cultura, v. 3, p.20-28, 2008.

- BORTOLOTTI, F. **O efeito da ordenação e estrutura geométrica dos materiais PtSn/C e PdSn/C na eletrooxidação do glicerol em meio alcalino.** 2016. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências – Bauru, 92p.
- CÂNDIDO, A. S.; *et al.* **Desenvolvimento de catalisadores para oxidação de glicerol.** 2013. Cadernos de Graduação – Ciências Exatas e Tecnológicas. Sergipe, v. 1, n.16, p.45-60.
- COUTINHO, J. W. D. **Estudo eletroquímico de catalisadores de Pt-Mo e Pt-Cd para a oxidação eletroquímica de etilenoglicol para a possível aplicação em células a combustível diretas a álcool.** 2017. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Química/ccet, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 76p.
- GOMES, J. F.; *et al.* **Insights into the adsorption and electro-oxidation of glycerol: Self-inhibition and concentration effects.** Journal of Catalysis, v. 301, p. 154-161, 2013.
- GOMES, J. F.; TREMILIOSI-FILHO, G. **Spectroscopic Studies of the Glycerol Electro-oxidation on Polycrystalline Au and Pt Surfaces in Acid and Alkaline Media.** Electroatal, v. 2, p. 96-105, 2011.
- GONÇALVES, B. R. L. **Estudo da eletrocatalise da reação de oxidação do glicerol sobre as fases intermetálicas ordenadas PtSn/C e AuSn/C.** 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade Paulista. Faculdade de Ciências, Bauru, 150p.
- GONZALEZ, E. R. **Eletrocatalise e poluição ambiental.** Química Nova, v. 23, p. 262-266, 2000.
- JUNIOR, E. F. F. **Desenvolvimento de uma célula a combustível de glicerol direto em meio alcalino.** 2015. Dissertação (Mestrado em Química) – Curso de Pós graduação em Química, Universidade de Brasília, Brasília, 128p.
- LIMA, S. A. S. C. **Eletrocatalisadores de PtSn/C em diferentes composições para estudo da eletrooxidação de etilenoglicol para aplicação em células a combustível de álcool direto.** 2015. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Química, Universidade Federal do Amazonas, 65p.
- MEDEIROS, M. E.; *et al.* **Pilhas a combustível de óxido sólido: Materiais, componentes e configurações.** Química Nova, v. 30, n.1, p.189-197, 2007.
- NUNES, F. A. **Efeito catalítico de eletrodos de Pt/C, PtIr/C, PtW/C e PtRe/C sobre reação de oxidação de etanol e glicerol.** 2012. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Química, Universidade Federal do Maranhão, 70p.
- PEITER, G. C.; *et al.* **Alternativas para o uso do glicerol produzido a partir do biodiesel.** Revista Brasileira de Energia Renovável, v. 5, n. 4, p. 519-537, 2016.
- SANTOS, C. R. Z. **Atividade e estabilidade proeminentes de nanopartículas de PtIrO<sub>x</sub> decoradas com Rh para eletro-oxidação de glicerol.** 2015. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, MS, 67p.
- SARON, C. **Mudanças climáticas globais e o desenvolvimento da tecnologia de células a combustível.** Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 22, p. 16-28, 2007.
- SILVA, E. D. **Eletro-oxidação do Glicerol para produção de Alfa-Hidroxiácidos.** 2013. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco, 105p.
- SILVA, E. P.; DORÇA, D. A.; CAMACHO, J. R. **Uma abordagem sobre células a combustível de álcool direto – DAFC.** V. – CEEL (Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica) Minas Gerais.

Universidade Federal de Uberlândia. p. 1-4, 2007.

SIMÕES, M.; BARANTON, S.; COUTANCEAU, C. **Electro-oxidation of glycerol at Pd based nanocatalysts for an application in alkaline fuel cells for chemicals and energy cogeneration.** Applied Catalysis B: Environmental. v. 93, p. 354-362, 2010.

SOUZA, E. A. **Estudo de Eletrocatalisadores para a reação de oxidação de metanol direto em células a combustível de eletrólito polimérico.** 2009. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Química, Universidade Federal do Amazonas, 84p.

TICIANELLI, E. A.; GONZALEZ, E. R. **Células a combustível: uma alternativa promissora para a geração de eletricidade.** Química Nova, v. 12, p. 268-271, 1989.

TICIANELLI, E. A.; GONZALEZ, E. R. **Eletroquímica: Princípios e Aplicações.** 2 ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, p. 165-167, 2005.

WANG, R.; *et al.* **Effect of structure of Ni nanoparticles on the electrocatalytic activity of Ni-Pd/C for formic acid oxidation.** International Journal of Hydrogen Energy, n. 38, p. 13125-13131, 2013.

WENDT, H.; GOTZ, M.; LINARDI, M. **Tecnologia de células a combustível.** Química Nova, v. 23, n.4, p. 538-546, 2000.

## ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICO ECONÔMICA DO BIOGÁS DA SUINOCULTURA PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

### **Arilson Darlison Lima Leal**

Instituto Federal Goiano, Estudante de Iniciação Científica.

Rio Verde – Goiás

### **Carla Caroline Carvalho Poças**

Instituto Federal Goiano, Estudante de Iniciação Científica.

Rio Verde – Goiás

### **Aroldo José Teixeira de Souza Filho**

Instituto Federal Goiano, Colaborador

Rio Verde – Goiás

### **João Areis Ferreira Barbosa Junior**

Instituto Federal Goiano, Orientador

Rio Verde – Goiás

**RESUMO:** Para atender ao aumento da demanda de energia elétrica, tem-se buscado fontes alternativas e renováveis. A suinocultura se tornou uma importante atividade econômica, mas que exige uma atenção especial, devido ao grande volume de dejetos produzidos e questões ambientais. Neste sentido, utiliza-se o biodigestor, que além de permitir o tratamento adequado aos dejetos suínos, apresenta como subprodutos do processo de digestão, o biogás e o biofertilizante. Porém, devido ao não domínio da técnica e o desconhecimento das variáveis associadas ao processo de digestão anaeróbia, é observado uma dificuldade para produtores na utilização dessa tecnologia,

devido aos altos investimentos de implantação e tempo de retorno longo. Assim surge o presente trabalho, buscando avaliar a viabilidade técnico-econômica, através de informações necessárias quanto ao funcionamento da atividade suinícola que contem biodigestores com geradores ligados à rede elétrica.

**PALAVRAS-CHAVE:** Biodigestores, dejetos suínos, motor-gerador e biofertilizante.

**ABSTRACT:** In order to meet the increase in demand for electricity, alternative and renewable sources have been sought. Pig farming has become an important economic activity, but requires special attention due to the large volume of waste produced and environmental issues. So the biodigester is used, which besides allowing the appropriate treatment to swine manure, presents as by-products of the digestion process, biogas and biofertilizer. However, due to the lack of technique and lack of knowledge of the variables associated with the anaerobic digestion process, a difficulty is observed for producers in the use of this technology, due to the high investments in implantation and long return time. Thus, the present study seeks to evaluate the technical-economic viability, through the necessary information regarding the operation of the swine activity, that contains biodigestors with generators connected to the electric network.

**KEYWORDS:** Biodigesters, swine manure, motor-generator and biofertilizer.

## 1 | INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da suinocultura, constitui-se em importante fator do desenvolvimento econômico para o país, segundo Santos (2015). A suinocultura brasileira origina cerca de 600 mil empregos e sua produção concentra-se especialmente na região sul, sendo esta responsável por 61,4% da produção nacional.

Este aumento da produção, somado com a concentração da atividade suinícola em algumas regiões específicas, aumenta a concentração de dejetos, bem como as preocupações inerentes a estes. As maiores preocupações ambientais relacionadas à suinocultura, quando não é realizado o tratamento adequado dos dejetos, referem-se à possibilidade de contaminação do solo e lençol freático, sejam elas pela lixiviação dos dejetos, e a liberação de gases como o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) e gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), que em grandes quantidades são maléficos para a biosfera (SARDÁ et al. 2010).

Para mitigar tais questões, existe a tecnologia dos biodigestores, que consiste, basicamente, em uma câmara fechada onde a biomassa (o volume de esterco suíno produzido) é fermentada anaerobicamente, isto é, sem a presença do ar atmosférico, produzindo biogás e biofertilizante (GASPAR et al. 2003). O biodigestor reduz o impacto ambiental e ainda gera subprodutos, que posteriormente venha a contribuir financeiramente na redução de gastos provenientes da atividade.

Um dos produtos obtidos com o biodigestor, é a produção de biogás, que dependendo da capacidade de produção, os suinocultores podem se tornar autossustentáveis energeticamente, por meio da geração de energia elétrica, além de obter biofertilizante (Oliveira, 2006). Para isso, o uso de grupo motor-gerador adaptado para biogás, fazem com que os custos de energia e demanda passem a serem nulos ou reduzidos (ANTÔNIO, 2016).

Dessa forma, o presente trabalho busca proporcionar uma avaliação do desempenho de biodigestores no Sudoeste Goiano, focalizando a produção de dejetos, biogás, energia elétrica como um todo, levantando dados que apontam a viabilidade financeira na utilização de tal equipamento.

## 2 | MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente foi avaliado o trabalho com o modelo suinícola adotado na região. A forma de manejo dos animais, a quantidade e a fase de vida, foram analisadas e sintetizadas para por meio de um memorial físico-descritivo do ambiente. O bem-estar do animal é importante para a valorização e qualificação do produto (VIEIRA, 2016). Neste contexto, foram realizados levantamento dos dados gerais sobre: produção suinícola, produção de dejetos, biodigestor e pulmão, motor-gerador e lagoa, realizando

uma descrição do ambiente, a atividade exercida e o produto ou objeção esperada.

Foi quantificada a produção de dejetos pela atividade suinícola, através do levantamento total de animais inseridos na produção, obtendo uma relação entre o dado, que é 12.549 cabeças e a produção média de dejetos por cabeça, que segundo Oliveira (2006), cada suíno adulto produz em média 7 - 8 litros de dejetos líquidos por dia.

Na quantificação de biogás produzido na propriedade, basta multiplicar a quantidade de animais presentes na propriedade pela as métricas adotadas de estudos científicos. Valor que é atribuído em produção de 1 animal por dia.

Para quantificação da energia elétrica produzida, foi colhida informações técnicas do gerador, que utiliza um valor de configuração de produção de acordo com as condições de queima do metano ( $CH_4$ ), valor que multiplicado pelas horas trabalhadas do grupo motor-gerador, fornece a potência gerada na propriedade.

O Produto entre a tarifa rural da região pela potência gerada mensal, descreve o lucro que a propriedade obtém, valor que pode ser contraditório, caso o cálculo reverso da conta de energia distinguir com o valor calculado. Portanto, verifica-se o consumo de biogás mensal do gerador com o real valor apresentado de produção, obtendo assim, o aproveitamento que a tecnologia proporciona a propriedade.

### 3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

O memorial físico-descritivo aborda os processos da atividade suinícola, informando ao produtor pontos do meio produtivo, apresentado na tabela 1. Nele são apresentados a granja, com as diversas etapas do processo, seus produtos e subprodutos.

Memorial Físico-Descritivo		
Baías	Ambiente	Cerca de 4183 suínos por núcleo (total 12549 animais), contendo área com bebedouros e valas para alimentação.
	Atividade	Umidificação e controle de temperatura.
	Produto a ser obtido	Dejeto suíno.
Biodigestor	Ambiente	Sem incidência solar interna e dejetos ao fundo da campana.
	Atividade	Atuação das bactérias metanogênicas.
	Produto a ser obtido	O biogás e o biofertilizante junto com o substrato dos dejetos.
Pulmão	Ambiente	O pulmão é o local na granja onde é destinado todo biogás gerado na propriedade.
	Atividade	Com a utilização de um compressor, o pulmão é abastecido por biogás. Sendo assim com o tráfego do gás, a destinação para o motor-gerador é mais vantajosa e proveitosa.
	Produto a ser obtido	Gás a uma taxa de compressão adequada para o motor-gerador.

Motor- Gerador	Ambiente	Ambiente fechado, livre de intervenções externas.
	Atividade	Queima do biogás e movimentação dos pistões do motor.
	Produto a ser obtido	Corrente elétrica alternada.
Lagoa	Ambiente	Estruturas impermeáveis e ambiente longe de vegetação.
	Atividade	É destinada a lagoa, a parte hídrica que ficou no interior do biodigestor, onde a mesma será acumulada e reservada para que atinjam qualidade de aplicação em lavouras.
	Produto a ser obtido	Biofertilizante com quantidades expressivas de Pentóxido de fósforo ( $P_2O_5$ ), Nitrogênio (N) e Óxido de potássio ( $K_2O$ )

**Tabela 1** – Memorial Físico-Descritivo.

Fonte: Autor

Na quantificação da produção total de dejetos na propriedade, foi considerado um valor de produção de 0,007 m<sup>3</sup> de dejetos por cabeça, valor que multiplicado pela quantidade de animais, resulta em 87,84 m<sup>3</sup> de dejetos gerados diariamente.

Na determinação do biogás gerado, utilizou-se as métricas expostas por Moraes (2012) e Antônio (2016), seguindo do fabricante ER-BR, com 0,076 m<sup>3</sup>, 0,18 m<sup>3</sup> e 0,4 m<sup>3</sup> para a produção por cabeça de biogás diário em cada referência respectivamente. Obtendo então, 953,72 m<sup>3</sup>, 2.258,82 m<sup>3</sup> e 5.019,6 m<sup>3</sup> de biogás para a propriedade. Porém, nenhum dos valores corresponde à realidade do cenário encontrado, cujo valor é de 0,0245 m<sup>3</sup>.suíno<sup>-1</sup>, resultando em uma produção média de 307,45 m<sup>3</sup>.dia<sup>-1</sup> na granja.

O valor de consumo específico adotado de produção de biogás na descrição do modelo do motor-gerador (modelo SCANIA 330 kVA) é apresentado na tabela 2. Nesta, para uma concentração de CH<sub>4</sub> em 65%, obtém-se uma produção equivalente de 2,18 kW.m<sup>-3</sup> de biogás queimado, resultando em uma geração total de 20.107,23 kW.mês<sup>-1</sup>, sendo esta a produção aproximada referente ao mês de abril de 2018. A partir dessa produção, pode-se estimar uma geração estimada de biogás de 9.223,5 m<sup>3</sup>.mês<sup>-1</sup>, contrapondo aos valores das bibliografias apresentadas.

Considerando que na propriedade o gerador foi configurado para trabalhar no regime de operação de 190 kWh e tendo como base a geração de energia de 670,24 kWh.dia<sup>-1</sup>, estimou-se um que o gerador trabalhou cerca de 3,53 h.dia<sup>-1</sup>. Utilizando a tarifa rural de R\$ 0,42.kWh<sup>-1</sup>, calculou-se uma receita bruta de R\$ 281,50.dia<sup>-1</sup> ou R\$ 8.445,02.mês<sup>-1</sup>.

MOTOR POTÊNCIA	*Geração em Base Load		65% DE METANO (5.500 kcal.m <sup>-3</sup> )		75% DE METANO (6.500 kcal.m <sup>-3</sup> )	
	Por hora	24 horas	Consumo de biogás		Consumo de biogás	
<b>SCANIA 330 kVA</b>	211 kWh	5.064 kWh	97 m <sup>3</sup> /h	2.328 m <sup>3</sup> / dia	82 m <sup>3</sup> /h	1.968 m <sup>3</sup> / dia

Tabela 2 - Consumo de biogás e produção diária de energia elétrica em base Load – kW/hora

Fonte: ER-BR (2018). Base Load = Geração contínua (24 h) com potência total do grupo gerador.

Apesar dos resultados promissores alcançados pela tecnologia supracitada, deve-se destacar a necessidade de outros estudos, sobretudo visando a busca por um incremento na produção de biogás através a partir da biodigestão anaeróbica, além da melhoria global da eficiência do processo de conversão de energia.

#### 4 | CONCLUSÃO

Com uma receita bruta de aproximadamente R\$ 8.445,02 reais mensais na conta de energia da propriedade, na forma de compensação de energia, observa-se que a tecnologia de biodigestores se projeta como um grande potencial quanto na melhoria do agronegócio relacionada a atividade suinícola, objetivando eficiência de produção de energia elétrica e minimização de impactos ambientais.

Deve-se destacar os agradecimentos ao IF Goiano, pelo apoio financeiro para transporte e execução do projeto, e ao proprietário Ivan Klein (Fazenda Talhado).

#### REFERÊNCIAS

ANTONIO, A. S. **VIABILIDADE ECONÔMICA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS DE PRODUÇÃO DE SUÍNOS DE MINAS GERAIS**. UFV. Universidade Federal de Viçosa. 2016.

DE OLIVEIRA, P. A. V.; HIGARASHI, M. M. **Unidade de compostagem para o tratamento dos dejetos de suínos**. Embrapa Suínos e Aves-Documents (INFOTECA-E), 2006.

ER-BR - Energias Renováveis. Disponível em: <<http://www.erbr.com.br/default/index.php>> . Acesso em: 12 jul. 2018.

GASPAR, R. M. B. L. **UTILIZAÇÃO DE BIODIGESTORES EM PEQUENAS E MÉDIAS PROPRIEDADES RURAIS COM ÊNFASE NA AGREGAÇÃO DE VALOR: UM ESTUDO DE CASO NA REGIÃO DE TOLEDO-PR**. 2003.

MORAIS, M. A. **Estudo experimental e avaliação econômica da operação de Biodigestores Tubulares para a produção de Biogás a partir de resíduos da Suinocultura**. 2012. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

SANTOS, L. D. **Modelagem matemática para a cadeia de suprimento de dejetos de suínos para formação de biogás e biofertilizante: uma aplicação em Tupandi/RS**. 2015.

SARDÁ, L. G.; HIGARASHI, M. M.; MULLER, S.; OLIVEIRA, P. A.; COMIN, J. J. **Redução da emissão de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e H<sub>2</sub>S através da compostagem de dejetos suínos**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 14, n. 9, p. 1008-1013, 2010.

VIEIRA, E. M. **Uma proposta metodológica para dimensionamento e implantação de biodigestores em pequenas e médias granjas suinícolas**. 2016. 47 p. Monografia (Curso de Bacharelado de Engenharia Ambiental) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, Rio Verde, 2016.

## **SOBRE O ORGANIZADOR**

**João Dallamuta:** Professor assistente da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Engenharia de Telecomunicações pela UFPR. MBA em Gestão pela FAE Business School, Mestre pela UEL. Trabalha com Gestão da Inovação, Empreendedorismo e Inteligência de Mercado.

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-7247-355-2

