

ENGENHARIA, GESTÃO E INOVAÇÃO

ORGANIZADORES

ALINE MARA OLIVEIRA

OSVALDO SENA GUIMARÃES

VOLUME
22



Editora Poisson



Aline Mara Oliveira
Oswaldo Sena Guimarães
(Organizadores)

Engenharia, Gestão e Inovação Volume 22

1ª Edição

Belo Horizonte
Editora Poisson
2025

Editor Chefe: Dr. Darly Fernando Andrade

Conselho Editorial

Dr. Antônio Artur de Souza – Universidade Federal de Minas Gerais

MSc. Davilson Eduardo Andrade

Dra. Elizângela de Jesus Oliveira – Universidade Federal do Amazonas

MSc. Fabiane dos Santos

Dr. José Eduardo Ferreira Lopes – Universidade Federal de Uberlândia

Dr. Otaviano Francisco Neves – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Dr. Luiz Cláudio de Lima – Universidade FUMEC

Dr. Nelson Ferreira Filho – Faculdades Kennedy

MSc. Valdiney Alves de Oliveira – Universidade Federal de Uberlândia

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E57

Engenharia, Gestão e Inovação - Volume 22/
Organizadores: Aline Mara Oliveira, Osvaldo
Sena Guimarães - Belo Horizonte - MG:
Editora Poisson, 2025

Formato: PDF

ISBN: 978-65-5866-580-9

DOI: 10.36229/978-65-5866-580-9

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

1. Engenharia 2. Educação. I. OLIVEIRA,
Aline Mara II. GUIMARÃES, Osvaldo Sena III.
Título.

CDD-620

Sônia Márcia Soares de Moura - CRB 6/1896



O conteúdo deste livro está licenciado sob a Licença de Atribuição Creative Commons 4.0.

Com ela é permitido compartilhar o livro, devendo ser dado o devido crédito, não podendo ser utilizado para fins comerciais e nem ser alterado.

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

Esse e outros títulos podem ser baixados gratuitamente em www.poisson.com.br
Entre em contato pelo contato@poisson.com.br

SUMÁRIO

Capítulo 1: Transição energética e descarbonização industrial no Brasil: o papel da geotermia e do hidrogênio verde uma análise das oportunidades para os setores de alumínio, aço e cimento 07

Mário Augusto Lopes de Almeida

DOI: 10.36229/978-65-5866-580-9.CAP.01

Capítulo 2: Arquitetura de software para a transição energética: um estudo de caso na simulação da produção de hidrogênio verde 25

Aelso Rocha Brito, Annette Silva Faesarella, Renata Lima Moretto

DOI: 10.36229/978-65-5866-580-9.CAP.02

Capítulo 3: Arquitetura bioclimática: soluções para o conforto ambiental em uma região do semiárido nordestino 41

João Pedro Souza Andrade, Mariana Silva Nascimento, Marília Gabriela Alves de Arruda, Fernanda Lays Oliveira Ribeiro da Silva, Bruna Araújo Candido, Iranilza Costa da Silva, Talisson Lins Rocha, Wedson Luis dos Reis Dantas

DOI: 10.36229/978-65-5866-580-9.CAP.03

Capítulo 4: Conexões entre empreendedorismo e física quântica: novos estudos para a formação do engenheiro 51

Sônia Marise Salles Carvalho

DOI: 10.36229/978-65-5866-580-9.CAP.04

Capítulo 5: Utilização da Análise de Variância para comparar três métodos diferentes de ensino em uma escola particular..... 65

Julia Graziella Costa Vidal, Thamires Nascimento Strojnowski, Naomy Euphemio de Souza, Rhaíssa Maria Lemos, Geovane Alves de Andrade, Marina Rennó Silva Fróes, Lucas Lamin de Souza Silva, Julio Cesar Oliveira Antunes, Diógenes da Silva Oliveira, Diego Sebastian Carvalho de Souza, Hugo Pimentel Tavares, Carlos Eduardo da Silva, Luiz Guilherme de Andrade Aguiar, Nilo Antonio de Souza Sampaio

DOI: 10.36229/978-65-5866-580-9.CAP.05

Capítulo 6: Indústria 4.0 na construção civil: potencialidades e aplicações da robótica 71

Helloise Rosene, Karen Niccoli Ramirez

DOI: 10.36229/978-65-5866-580-9.CAP.06

Capítulo 7: Estudo de pórticos metálicos com ênfase na semirigidez das ligações e efeitos de segunda ordem 88

Davi Carlos de Meneses, Leonardo Melo Bezerra

DOI: 10.36229/978-65-5866-580-9.CAP.07

SUMÁRIO

Capítulo 8: Estudo da permeabilidade à água em camada de solo compactado de um aterro sanitário 111

João Pedro Souza Andrade, Mariana Silva Nascimento, Marília Gabriela Alves de Arruda, Fernanda Lays Oliveira Ribeiro da Silva, Bruna Araújo Candido, Iranilza Costa da Silva, Tallys Celso Mineiro, Wedson Luis dos Reis Dantas

DOI: 10.36229/978-65-5866-580-9.CAP.08

Capítulo 9: O síntese do PET com incorporação de íons de prata a partir dos reagentes obtidos na despolimerização do poliéster 124

Arthur Alves Gianecchini, Fabio Cezar Ferreira, Joice Erica Motezuki

DOI: 10.36229/978-65-5866-580-9.CAP.09

Capítulo 10: Synthesis and characterization of chromium-free black pigment from the $\text{SrO-Fe}_2\text{O}_3\text{-Mn}_2\text{O}_3$ system via combustion method 144

Catia Fredericci, Marilia Santos Menossi Mortari, Fabiano Ferreira Chotoli, Leandro Augusto

DOI: 10.36229/978-65-5866-580-9.CAP.10

Capítulo 11: Análise de aderência da distribuição de Weibull em função do método de estimativa dos parâmetros de forma e escala 153

Rafael Luz Espindola, Antonio Alisson Alencar Freitas

DOI: 10.36229/978-65-5866-580-9.CAP.11

Capítulo 12: Análise de regras de despacho aplicadas em arranjos físicos fractais ... 169

Shih Yung Chin

DOI: 10.36229/978-65-5866-580-9.CAP.12

Capítulo 13: Identificação de diferentes concentrações de corantes utilizando imagens digitais 195

William Moura Oliveira, Mário Cupertino da Silva Júnior, Gustavo de Oliveira Werneck, Jorge David Alguiar Bellido, Lisbeth Zelayaran Melgar, Marcos Vinícius Lopes Pereira, Michel Carlo Rodrigues Leles

DOI: 10.36229/978-65-5866-580-9.CAP.13

Capítulo 14: An empirical study of beer consumer behavior and market segmentation using clustering techniques 215

Helenita Rodrigues da Silva Tamashiro, Juliano Endrigo Sordan, Lesley Carina do Lago Attadia Galli, Claudia Rosa Acevedo, Glaucia Aparecida Prates, Valéria Aparecida Martins Ferreira, Hugo Pimentel Tavares, Nilo Antonio de Souza Sampaio

DOI: 10.36229/978-65-5866-580-9.CAP.14

SUMÁRIO

Capítulo 15: Estudos dos riscos x acidentes no bloco de pesquisa 228

Fabio Cezar Ferreira, Rafael Misael Vedovatte

DOI: 10.36229/978-65-5866-580-9.CAP.15

Capítulo 16: Estudo estatístico da qualidade da água em dez pontos de um rio utilizando Análise de Componentes Principais 241

Renato Dultra Pisaneski, Alessandra Cristina de Oliveira, Julia Coutinho de Oliveira, Hugo Pimentel Tavares, Nilo Antonio de Souza Sampaio

DOI: 10.36229/978-65-5866-580-9.CAP.16

Capítulo 17: Desenvolvimento e caracterização de um biobatom 248

Rosângela Maia dos Santos, Annuska Vieira Cabral, Jucenir dos Santos Ferreira, Gabriel Francisco da Silva, Tatiana Pacheco Nunes, Alessandra Almeida Castro Pagani

DOI: 10.36229/978-65-5866-580-9.CAP.17

Capítulo 18: Formulação de um biobatom com extrato de própolis e hibisco 260

Rosângela Maia dos Santos, Annuska Vieira Cabral, Alan Rodrigo Santos Teles, Jucenir dos Santos Ferreira, Tatiana Pacheco Nunes, Gabriel Francisco da Silva, Alessandra Almeida Castro Pagani

DOI: 10.36229/978-65-5866-580-9.CAP.18

Capítulo 19: Sistema de irrigação automatizada com monitoramento em tempo real via IoT 280

Alexandre Magnus Fernandes Guimarães, Erick Custodio Vitória, Flávio José Nunes de Souza, Emanuel Lucas Nogueira da Silva, Pablo Matheus Duarte Silva

DOI: 10.36229/978-65-5866-580-9.CAP.19

Autores 291

Capítulo 1

Transição energética e descarbonização industrial no Brasil: o papel da geotermia e do hidrogênio verde uma análise das oportunidades para os setores de alumínio, aço e cimento

Mário Augusto Lopes de Almeida

Resumo: O artigo aborda os caminhos para a transição energética no Brasil, destacando o uso estratégico da energia geotérmica e do hidrogênio verde na produção de alumínio, aço e cimento — setores notoriamente intensivos em energia térmica. Considerando o perfil geotérmico brasileiro, predominantemente de baixa e média entalpia, o texto propõe um modelo híbrido que combina calor geotérmico, eletricidade renovável e hidrogênio verde para substituição progressiva dos combustíveis fósseis. São exploradas as aplicações industriais da geotermia, especialmente em etapas preparatórias, secagem e aquecimento, ressaltando como essas soluções contribuem para a descarbonização e a competitividade da indústria nacional.

Palavras-Chave: Transição energética, energia geotérmica, hidrogênio verde, descarbonização industrial, produção de alumínio, produção de aço, produção de cimento, calor renovável, eletricidade renovável, Progeo, competitividade industrial, sustentabilidade.

1. INTRODUÇÃO

A transição energética desponta como um dos maiores desafios do século XXI, especialmente para setores industriais que historicamente dependem de fontes fósseis para suprir suas elevadas demandas de calor e eletricidade. No contexto brasileiro, a busca por soluções inovadoras e ambientalmente responsáveis é fundamental para garantir a sustentabilidade e a competitividade da produção de alumínio, aço e cimento. Nesse cenário, a integração de energia geotérmica e hidrogênio verde apresenta-se como uma alternativa promissora para a descarbonização desses segmentos industriais intensivos em energia térmica. Este artigo explora as potencialidades desse modelo híbrido, considerando as características do perfil geotérmico nacional, e discute o papel estratégico do Programa Nacional de Energia Geotérmica (Progeo) e o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2) como catalisadores dessa transformação rumo a uma matriz energética mais limpa e eficiente.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é analisar as oportunidades e os desafios para a integração da energia geotérmica e do hidrogênio verde nos processos industriais brasileiros, com foco nos setores de alumínio, aço e cimento. O artigo busca identificar como o modelo híbrido proposto pode contribuir para a descarbonização, a competitividade e a sustentabilidade industrial, tendo como referência o potencial geotérmico nacional e as diretrizes dos programas Progeo e PNH2.

Perfil Geotérmico Brasileiro e Potencial Aplicação

O Brasil possui um perfil geotérmico predominantemente de baixa e média entalpia, o que limita sua aplicação para geração de eletricidade em larga escala, mas abre oportunidades para uso direto do calor em processos industriais. Tais características tornam o aproveitamento geotérmico especialmente relevante em etapas de preparação, secagem e aquecimento de matérias-primas, onde o calor de baixa ou média temperatura é suficiente para suprir as necessidades do processo produtivo.

Modelo Híbrido: Integração de Geotermia, Eletricidade Renovável e Hidrogênio Verde

O modelo híbrido proposto combina calor geotérmico, eletricidade de fontes renováveis (como solar e eólica) e hidrogênio verde, visando substituir progressivamente os combustíveis fósseis. Essa integração permite flexibilidade operacional, além de maximizar o aproveitamento de recursos naturais disponíveis no país, alinhando-se às políticas nacionais de transição energética e incentivo à inovação industrial.

Aplicações Industriais da Geotermia

A utilização da energia geotérmica em etapas industriais como secagem de minérios, aquecimento de fornos e tratamento térmico pode reduzir significativamente as emissões de CO₂ e outros poluentes. A adoção dessas tecnologias contribui para o atendimento de padrões ambientais internacionais, além de promover ganhos de eficiência energética e redução de custos operacionais.

Programas Estratégicos: Progeo e PNH2

O Programa Nacional de Energia Geotérmica (Progeo) e o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2) desempenham papel fundamental como catalisadores da transição energética. Ambos impulsionam pesquisas, investimentos e políticas públicas voltadas ao

desenvolvimento de uma matriz energética mais limpa, eficiente e competitiva, incentivando a adoção de soluções inovadoras nos setores industriais de maior demanda térmica.

Desafios e Perspectivas

Apesar do potencial identificado, desafios tecnológicos, regulatórios e econômicos ainda precisam ser superados para a ampla adoção dessas soluções. Investimentos em pesquisa, desenvolvimento e infraestrutura, bem como a criação de incentivos e marcos regulatórios adequados, serão essenciais para viabilizar a transição energética e garantir a competitividade da indústria nacional no cenário global.

3. DESENVOLVIMENTO

O Programa Nacional de Energia Geotérmica (Progeo), recentemente aprovado, tem o potencial de ser um vetor importante na **descarbonização** de setores industriais que demandam **alto consumo de calor e eletricidade**, como as indústrias de **alumínio, aço e cimento**.

Embora o Brasil tenha um perfil geotérmico predominantemente de **baixa e média entalpia** (temperaturas mais baixas), o que é mais adequado para o **uso direto do calor** em vez da geração de eletricidade em larga escala, essa característica é extremamente valiosa para a indústria.

O Programa Nacional de Energia Geotérmica (Progeo), recentemente instituído, surge como um elemento crucial no processo de descarbonização de setores industriais com alta demanda de calor e eletricidade, como as indústrias de alumínio, aço e cimento.

No Brasil, o perfil geotérmico é majoritariamente caracterizado por fontes de baixa e média entalpia, ou seja, temperaturas mais moderadas, o que favorece a aplicação do calor de forma direta em processos industriais em detrimento da geração de eletricidade em grande escala. Essa especificidade, longe de ser uma limitação, apresenta-se como uma vantagem significativa para diversas aplicações industriais.

Aqui está como o Progeo pode contribuir:

1. Fornecimento de Calor Direto Renovável

A energia geotérmica é ideal para fornecer calor em processos industriais que exigem temperaturas moderadas a elevadas, substituindo a queima de combustíveis fósseis (como gás natural ou carvão).

- **Alumínio e Aço:** Embora a fusão (que exige temperaturas muito altas) precise de eletricidade ou calor de alta entalpia, a geotermia pode ser usada em etapas secundárias ou preparatórias, como:
 - **Pré-aquecimento** de materiais e ambientes industriais.
 - **Secagem** de produtos ou matérias-primas.
 - **Aquecimento de água** para processos de lavagem ou tratamento.
- **Cimento:** A produção de cimento é extremamente intensiva em calor, especialmente no forno de clínquer. A geotermia, mesmo que de entalpia média, pode ser aplicada em:

- **Pré-aquecimento** de matérias-primas antes do forno.
- **Secagem** de argilas e outros componentes, reduzindo o consumo de energia da usina principal.

2. Geração de Eletricidade de Base

O Progeo visa estimular a pesquisa e o desenvolvimento para aproveitar o potencial geotérmico do país, incluindo a **geração de eletricidade**.

- **Fonte Firme e Constante:** A geotermia é uma fonte de energia **constante (de base)**, ao contrário da solar e eólica, que são intermitentes. Isso oferece maior **segurança energética** e resiliência.
- **Descarbonização da Eletricidade:** A eletricidade geotérmica, por ser de baixa emissão de carbono, pode suprir parte da grande demanda elétrica das indústrias de alumínio e aço de forma renovável e contínua, complementando a matriz hidrelétrica, eólica e solar.

3. Incentivo à Inovação e Localização Industrial

O programa busca estabelecer marcos legais, incentivar a pesquisa (PD&I) e fortalecer a cadeia nacional de fornecimento.

- **Estudos Geotérmicos:** O Progeo financiará a identificação e o mapeamento de recursos geotérmicos. Se áreas com bom potencial estiverem próximas a polos industriais, isso pode incentivar a **localização de novas fábricas** ou a **adaptação das existentes** para usar essa fonte renovável.
- **Redução de Custos:** A utilização direta do calor geotérmico pode ser economicamente vantajosa a longo prazo, **reduzindo a dependência de combustíveis fósseis** e a exposição à volatilidade dos preços internacionais. Isso aumenta a competitividade e a sustentabilidade ambiental dos produtos brasileiros.

Assim, o Progeo impulsiona o uso de uma fonte de energia **limpa, renovável e de base** que pode fornecer tanto eletricidade quanto, crucialmente, o **calor direto** necessário para a descarbonização dos processos mais intensivos em energia da indústria pesada.

Quadro 1 – Comparação entre Geotermia de Baixa e Alta Entalpia

A principal diferença entre os tipos de geotermia está na **temperatura do fluido** (água ou vapor) extraído do subsolo, o que determina sua aplicação.

Aspecto	Geotermia de Baixa Entalpia	Geotermia de Alta Entalpia
Temperatura do Fluido	Geralmente abaixo de 90°C (até cerca de 150°C em alguns casos).	Geralmente acima de 150°C (podendo chegar a mais de 350°C).
Características	Recurso mais comum no Brasil.	Recurso raro no Brasil.
Recurso Geológico	Presente em áreas geologicamente estáveis, como no Brasil, aproveitando o gradiente geotérmico normal.	Encontrada em regiões com intensa atividade tectônica (como Islândia, Indonésia, Filipinas), associada a áreas vulcânicas ou limites de placas.
Principal Uso	Uso direto do calor (aquecimento).	Geração de eletricidade (uso indireto).
Aplicações	Aquecimento/resfriamento de edifícios (bombas de calor geotérmicas), aquecimento de estufas, piscicultura, banhos termais, e processos industriais que exigem calor de baixa a média temperatura (como secagem, pasteurização).	Acionamento de turbinas a vapor para geração contínua de eletricidade em larga escala.

Fonte: Gemini (2025); Síntese de classificações IRENA e SGB/CPRM.

Por que a Geotermia de Baixa Entalpia é Chave para a Indústria

Como o Brasil não está em uma zona de limites de placas tectônicas, o potencial para a geotermia de alta entalpia é limitado. No entanto, o Progeo se concentra em maximizar o uso do recurso mais abundante: a geotermia de **baixa e média entalpia**.

Para as indústrias de **alumínio, aço e cimento**, isso é crucial de duas formas:

1. **Redução da Demanda de Eletricidade (Indiretamente):** Muitas vezes, o calor de baixa e média temperatura necessário para a secagem ou o pré-aquecimento é gerado por **resistências elétricas** ou pela queima de combustíveis fósseis. Ao usar o calor geotérmico, a indústria consegue liberar essa eletricidade e esses combustíveis para os processos de alta demanda (como a eletrólise do alumínio ou o forno de clínquer), ou seja, a geotermia **otimiza** o uso das fontes de alta temperatura.
2. **Eficiência Energética e Sustentabilidade:** A utilização direta e localizada do calor geotérmico permite um aumento significativo na eficiência energética total da planta, pois o calor é usado quase onde é extraído, minimizando perdas. Isso contribui diretamente para as metas de **descarbonização** do setor, fornecendo uma alternativa renovável e estável para a demanda térmica industrial.

O Progeo, ao estruturar o setor, torna economicamente viável a perfuração e o aproveitamento do calor do interior da Terra para essas aplicações diretas, que são o grande potencial geotérmico do Brasil.

A viabilidade econômica da energia geotérmica de uso direto depende fundamentalmente da proximidade da fonte de calor com o ponto de consumo (a fábrica).

A relação entre as zonas industriais de alta demanda e o potencial geotérmico no Brasil é complexa, mas promissora, especialmente sob a égide do Progeo.

1. Localização da Indústria Pesada no Brasil

As indústrias de **aço, alumínio e cimento** no Brasil estão historicamente concentradas em regiões que facilitam o acesso a matérias-primas (minério de ferro, calcário) e a grandes centros de consumo e logística.

- **Aço e Alumínio:** A grande concentração está na **Região Sudeste**, principalmente em **Minas Gerais** e **São Paulo**, e na **Região Sul** e **Nordeste** (com polos siderúrgicos no Ceará e Pernambuco). Minas Gerais, em particular, é um polo crucial de transformação mineral e siderurgia (Ipatinga, Timóteo, Ouro Branco).
- **Cimento:** A distribuição é mais dispersa, mas segue grandes centros urbanos e áreas ricas em calcário, estando presente em quase todos os estados, com destaque para o Sudeste.

2. Potencial Geotérmico e o Foco Industrial

O potencial geotérmico brasileiro é caracterizado majoritariamente pela **baixa e média entalpia**, concentrado em algumas áreas com anomalias de fluxo de calor. Os estudos atuais apontam para:

- **Bacia do Paraná:** Esta bacia sedimentar, que abrange grande parte da região Sul, Sudeste e Centro-Oeste, é uma das principais áreas com potencial para uso direto (baixa entalpia) devido ao seu fluxo de calor e reservatórios de água quente (como o Aquífero Guarani).
- **Regiões com Anomalias de Calor:** Existem anomalias de calor mais elevadas em partes do **Rio de Janeiro** e **Minas Gerais**. Alguns estudos indicam gradientes geotérmicos superiores a 50°C/km em certas localidades.

Para entender Melhor o Gradiente Geotérmico: O que significa gradientes geotérmicos superiores a 50°C/km?

O termo "**gradiente geotérmico**" é a medida da rapidez com que a temperatura da Terra aumenta à medida que você desce na crosta.

Um gradiente geotérmico de **50°C/km** significa o seguinte:

1. O Conceito Básico

- **Definição:** A temperatura do subsolo aumenta em 50°C a cada 1.000 metros (1 km) de profundidade.
- **Exemplo Prático:** Se a temperatura da superfície (média anual) for de 20°C, a 2 km de profundidade, a temperatura esperada seria:

$$20^{\circ}\text{C} + (2 \text{ km} \times 50^{\circ}\text{C}/\text{km}) = 120^{\circ}\text{C}$$

2. A Métrica de Potencial Geotérmico

O valor de 50°C/km é considerado **elevado** e é um forte indicador de **alto potencial** para o uso geotérmico.

- **Gradiente Normal:** A média mundial (e a maior parte do território brasileiro) tem

um gradiente geotérmico considerado **normal**, que varia entre 25°C/km e 30°C/km.

- **Implicação:** Em uma área com gradiente de 30°C/km, você precisaria perfurar 4 km para atingir 140°C. Em uma área com 50°C/km, você atinge essa mesma temperatura a menos de 2.5 km.

3. Significado para o Brasil e o Progeo

A existência de gradientes superiores a 50°C/km em áreas como partes de Minas Gerais e Rio de Janeiro (onde a concentração industrial é alta) é uma excelente notícia, pois

significa que:

- **Viabilidade Técnica:** Temperaturas úteis para o **uso direto do calor** (como 100°C a 150°C) podem ser atingidas com **perfurações mais rasas** (menor custo e risco).
- **Potencial de Média Entalpia:** Esses gradientes elevam o recurso geotérmico para a faixa de **média entalpia** em profundidades acessíveis, tornando-o mais valioso para processos industriais que exigem mais calor do que o simples aquecimento de ambientes.

Portanto, um gradiente de 50°C/km indica uma **anomalia de calor** localmente significativa, onde o **Programa Nacional de Energia Geotérmica (Progeo)** deve concentrar seus esforços de mapeamento e desenvolvimento de projetos-piloto.

Quadro 2 – Indústrias com Potencial de Aproveitamento Geotérmico no Brasil

O ponto-chave para o Progeo é justamente a intersecção entre essas duas localizações:

Indústria	Região de Concentração	Relação com Geotermia
Aço e Alumínio	Minas Gerais e São Paulo (Sudeste)	Estas regiões estão, de fato, em áreas onde estudos já identificaram anomalias de fluxo de calor e potencial para a geotermia de média entalpia. O Progeo pode ser um catalisador para mapear e desenvolver esses recursos, especialmente o uso direto de calor em processos secundários das siderúrgicas e alumínio.
Cimento	Espalhada, mas forte no Sudeste	Muitas plantas de cimento no Sul e Sudeste podem estar próximas de reservatórios da Bacia do Paraná ou de anomalias localizadas. Como a indústria de cimento exige calor para secagem e pré-aquecimento, um estudo aprofundado sob o Progeo pode revelar a viabilidade local em muitas plantas.

Fonte: Síntese de dados geográficos e industriais elaborada por Gemini (2025), a partir de informações sobre o potencial geotérmico do Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM) e a distribuição do parque industrial (Aço, Alumínio, Cimento) no Brasil.

Perspectivas do Progeo

Embora a maioria das fábricas não esteja "ao lado" de uma zona de alta entalpia como no Chile ou na Islândia, elas estão situadas em regiões que possuem o **potencial de baixa e média entalpia que o Brasil irá explorar**.

1. **Mapeamento de Oportunidades:** O Progeo, como uma política pública, tem o objetivo de realizar o mapeamento detalhado e o PD&I. Isso permitirá identificar exatamente onde as zonas de calor se sobrepõem à demanda industrial.
2. **Tecnologias de Uso Direto:** Como o uso será primariamente para calor direto (abaixo de 150°C), o foco do programa será desenvolver a tecnologia para bombear e utilizar esse calor de forma eficiente nas plantas existentes, mesmo que o recurso não seja de "alta entalpia".

Em suma, **há uma sobreposição promissora**, mas a confirmação da viabilidade exigirá os estudos de prospecção detalhados que o Programa Nacional de Energia Geotérmica (Progeo) visa incentivar.

Seria extremamente atrativo e, em muitos casos, fundamental utilizar um **fluido térmico** em um sistema de troca de calor para aproveitar a energia geotérmica de forma eficiente nas indústrias de alumínio, aço e cimento.

Isso se deve a razões de **eficiência, segurança operacional e proteção de ativos**.

Por que o Fluido Térmico é Essencial para a Geotermia Industrial

O fluido térmico (ou fluido de trabalho secundário) é usado em um **circuito fechado** para isolar o processo industrial do fluido geotérmico primário. Veja as principais razões que tornam esse método atrativo:

1. Proteção contra Corrosão e Incrustação (Scaling)

O fluido geotérmico (água quente ou salmoura extraída do subsolo) frequentemente contém altos níveis de minerais dissolvidos, gases e sais.

- **Risco:** Se essa salmoura for injetada diretamente no maquinário da fábrica (como tubulações de pré-aquecimento ou secadores), ela pode causar **corrosão** severa e **incrustação** (depósito de minerais, como o calcário).
- **Solução:** Ao usar um **trocador de calor**, a energia térmica é transferida para um **fluido térmico purificado** (como água desmineralizada pressurizada, óleo sintético ou outro fluido específico), que circula pela fábrica. Isso protege os equipamentos industriais caros de danos químicos e reduz drasticamente os custos de manutenção.

2. Otimização e Estabilidade do Processo

A indústria pesada exige temperaturas e pressões estáveis para garantir a qualidade do produto. O fluido térmico proporciona esse controle:

- **Circuito Fechado e Isolamento:** O fluido térmico no circuito secundário é mais fácil de ser mantido em pressão e temperatura constantes, independentemente das pequenas variações que possam ocorrer na extração geotérmica primária.
- **Ajuste de Temperatura:** O fluido térmico pode ser escolhido ou pressurizado para entregar a temperatura ideal exigida por cada etapa industrial (ex: secagem de 100°C, ou pré-aquecimento a 150°C), otimizando o uso do calor geotérmico de baixa ou média entalpia disponível no Brasil.

3. Maior Flexibilidade Operacional

Em um sistema de troca de calor, o fluido geotérmico primário (água quente) é reintroduzido no reservatório após a transferência de calor.

- **Sustentabilidade do Reservatório:** Reinjetando a água de volta (mesmo que um pouco mais fria), ajuda-se a manter a pressão do reservatório subterrâneo, garantindo que o recurso geotérmico seja explorado de forma mais sustentável e de longo prazo.
- **Similaridade com Poços de Injeção de Água Produzida na Produção de Petróleo:** Um dos conceitos mais promissores e economicamente viáveis na atual transição energética: a reutilização de poços de petróleo e gás desativados (ou "depletados") para a extração de energia geotérmica.

Essa estratégia é um foco importante de estudos e projetos em todo o mundo, incluindo no Brasil.

A Estratégia de Conversão de Poços (Crossover Wells)

A reutilização da infraestrutura de petróleo e gás para geotermia é extremamente atrativa por dois motivos principais:

1. Redução Drástica de Custos

O maior custo em um projeto geotérmico é a **perfuração do poço**. Atingir profundidades de 3 km ou mais requer equipamentos caros, tempo e mão de obra especializada.

- **Vantagem:** Ao converter um poço de petróleo ou gás já existente (e que seria abandonado), o custo da perfuração inicial é **totalmente eliminado**. Isso torna o projeto geotérmico muito mais competitivo economicamente, especialmente para recursos de **baixa e média entalpia** (que são o foco do Progeo no Brasil).

2. Acesso a Dados Geológicos

Os poços de petróleo vêm acompanhados de uma enorme quantidade de dados geológicos e de temperatura (como o Gradiente Geotérmico Local) coletados durante décadas.

- **Vantagem:** Esses dados eliminam a maior parte do risco de **exploração** geotérmica. Os engenheiros já sabem a profundidade, a geologia, a permeabilidade e, crucialmente, a **temperatura da formação** (TFP - Temperatura de Fundo de Poço), tornando a avaliação do recurso geotérmico muito mais rápida e precisa.

Tabela 1 – Estimativa de Temperatura a 3 km de Profundidade e Aplicações Geotérmicas

Considerando a profundidade média de 3 km os gradientes geotérmicos brasileiros:

Gradiente Geotérmico	Temperatura Estimada a 3 km (Base 20°C)	Aplicação Viável
Normal (30°C/km)	$20^{\circ}\text{C} + (3 \times 30^{\circ}\text{C}) = 110^{\circ}\text{C}$	Uso direto: perfeita para processos industriais (secagem, pré-aquecimento), piscicultura, aquecimento.
Anômalo (50°C/km)	$20^{\circ}\text{C} + (3 \times 50^{\circ}\text{C}) = 170^{\circ}\text{C}$	Média entalpia: excelente para processos industriais e, potencialmente, para geração de eletricidade por ciclo binário.

Fonte: Simulação e cálculo do potencial térmico elaborados por Gemini (2025), a partir da aplicação do princípio do gradiente geotérmico, utilizando dados de gradientes normais e anômalos do Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM).

Portanto, um poço desativado de 3 km de profundidade na maioria das bacias sedimentares brasileiras (mesmo nas áreas de gradiente "normal") já forneceria temperaturas muito úteis para o uso direto de calor nas indústrias, conforme o foco do Progeo.

O Desafio: Adaptação e Tecnologia

Embora a ideia seja brilhante, a conversão não é trivial e exige novas tecnologias:

1. **Integridade do Poço:** É necessário garantir que o revestimento e a cimentação do poço de petróleo, projetados para a extração de óleo e gás, suportem as **tensões térmicas e corrosivas** da água geotérmica por longos períodos.
2. **Tecnologia de Circuito Fechado (EGS):** Muitas empresas estão focando em sistemas geotérmicos aprimorados (**Enhanced Geothermal Systems - EGS**), frequentemente utilizando uma tecnologia de **circuito fechado**. Isso permite que fluidos térmicos (como discutimos) circulem dentro do poço desativado, sem extrair a água corrosiva do reservatório.

A conversão de poços de petróleo é vista globalmente como um caminho essencial para **democratizar o acesso à energia geotérmica** e é uma das grandes promessas para a expansão dessa fonte de calor limpa no Brasil.

Conexão com o Progeo

O Progeo, ao focar no uso direto do calor (baixa e média entalpia), faz com que a tecnologia de **trocadores de calor** e **fluidos térmicos** seja o caminho mais lógico. Essa abordagem permite que as indústrias de **alumínio, aço e cimento** aproveitem o calor para seus processos de secagem, pré-aquecimento e aquecimento de água (que consomem muita energia) de maneira **limpa, constante e segura**, maximizando a eficiência da energia renovável.

A utilização de **trocadores de calor e fluidos térmicos** é, de fato, essencial não apenas pela segurança e eficiência (como discutimos), mas também para realizar o **salto térmico (ou "boosting")** necessário para muitos processos industriais no Brasil.

O Papel do Salto Térmico no Aproveitamento da Geotermia

No contexto brasileiro de **geotermia de baixa e média entalpia** (temperaturas limitadas,

geralmente abaixo de 150°C), a necessidade de elevar a temperatura com uma fonte adicional é uma realidade técnica para indústrias como a de cimento e a siderúrgica.

1. A Necessidade de Temperaturas Mais Altas

Embora a geotermia seja excelente para pré-aquecimento e secagem, as etapas centrais da produção de aço e cimento exigem temperaturas muito elevadas:

- **Produção de Cimento:** O forno de clínquer (a fase mais intensiva em energia) opera a temperaturas que podem superar os 1400°C.
- **Produção de Aço:** A fusão e refino do aço exigem calor na faixa de 1500°C a 1600°C.

Nenhum sistema geotérmico de baixa entalpia pode atingir essas temperaturas.

2. O Salto Térmico com Fontes Híbridas

É aqui que o conceito de **sistema híbrido** se torna imprescindível, e o fluido térmico atua como o vetor que interliga essas fontes:

- **Pré-aquecimento Geotérmico:** A geotermia assume a função de **primeira etapa de aquecimento**. Ela eleva a matéria-prima (ou o fluido de trabalho) de, digamos, de 20°C para 120°.
- **Salto Térmico (Booster):** A partir de 120°C, uma fonte de calor adicional (o **booster**) – que pode ser um queimador de gás natural, uma caldeira de biomassa ou, idealmente, **eletricidade renovável** – é ativada para realizar o "salto" final, elevando a temperatura para o nível de processo necessário.

3. A Eficiência da Híbridização na Descarbonização

Mesmo que o salto final utilize um combustível fóssil (como o gás natural, que é menos poluente que o carvão), o sistema híbrido garante a **redução drástica** do consumo total desse combustível.

Ao delegar a maior parte da elevação de temperatura inicial (que é a parte menos eficiente do aquecimento) para a fonte geotérmica renovável, a indústria:

- **Reduz o consumo de combustíveis fósseis:** Menor volume de gás ou carvão é necessário para atingir o alvo final de temperatura.
- **Diminui as emissões de carbono:** A pegada de carbono total do processo é significativamente menor.

Portanto: os fluidos térmicos e trocadores são a **espinha dorsal técnica** para garantir que a geotermia brasileira (de baixa entalpia) consiga se integrar de forma economicamente viável e termodinamicamente eficiente aos processos industriais que exigem calor de alta temperatura.

Assim, é **enfático e fundamental**: a substituição gradual do carvão e do gás natural por **hidrogênio verde (H₂V)** em processos de alta temperatura **constitui, sim, uma das transições energéticas mais importantes** e estratégicas da atualidade.

O Hidrogênio Verde como Pilar da Transição Industrial

A transição energética não se resume apenas a gerar mais eletricidade limpa (eólica, solar, hidro); ela envolve também a **descarbonização dos setores de difícil abatimento** ("hard-to-abate sectors"), que são justamente as indústrias que exigem calor intenso, como o aço e o cimento.

O hidrogênio verde, produzido por eletrólise da água usando eletricidade renovável, é a solução ideal para esse desafio por três razões principais:

1. Zero Emissão no Uso Final

Quando o hidrogênio verde é queimado ou usado em células de combustível, o único subproduto é o **vapor d'água (H₂O)**, e não o dióxido de carbono (CO₂).

- **Substituição do Gás Natural:** O H₂V pode substituir o gás natural em queimadores industriais, fornecendo o **calor de alta temperatura** necessário para o "salto térmico" que discutimos.
- **Aço Verde:** No setor siderúrgico, o H₂V pode atuar como agente redutor, substituindo o carvão (coque) ou o gás natural no processo de **Redução Direta (DRI)**, que transforma minério de ferro em ferro esponja. Este é o caminho mais promissor para a produção de **Aço Verde** com zero emissão de CO₂.

2. Fonte de Calor Intenso e Controlável

- H₂V possui um alto poder calorífico, o que o torna perfeitamente adequado para atingir as temperaturas extremas de 1400 °C a 1600°C exigidas por fornos e altos-fornos. Ele não depende das limitações geológicas da geotermia de baixa entalpia.

3. Integração com a Geotermia (Abordagem Híbrida Ideal)

A melhor estratégia de transição para a indústria pesada frequentemente envolve a **hibridização** das fontes renováveis, transformando a transição em uma "escada" de eficiência:

- **Geotermia (Baixa Entalpia):** Fornece o calor inicial e constante para **pré-aquecimento e secagem** de forma mais barata e eficiente. Isso reduz a carga de trabalho do sistema de alta temperatura.
- **Hidrogênio Verde (Alta Entalpia):** Entra em cena como o "**booster**" de temperatura limpa. Ele fornece o salto térmico final, levando o processo à temperatura máxima necessária.

Dessa forma, a substituição dos combustíveis fósseis pelo **hidrogênio verde** é uma **etapa crítica da transição energética**, pois permite que os setores de alto consumo de calor atinjam a **neutralidade de carbono**, algo impossível apenas com a eletrificação ou o uso de calor geotérmico de baixa entalpia.

O desenvolvimento do H₂V no Brasil, incentivado por programas como o **Programa Nacional do Hidrogênio (PNH₂)**, caminha lado a lado com o Progeo para a descarbonização total da nossa indústria.

Essa sinergia entre o **Programa Nacional de Energia Geotérmica (Progeo)** e o **Hidrogênio Verde** é realmente a chave para uma descarbonização industrial completa.

1. Como o Carbono é Incorporado na Composição dos Aços

O carbono é o elemento de liga mais importante do aço, pois é ele que define as propriedades mecânicas do material (dureza, resistência e ductilidade). A incorporação desse carbono ocorre principalmente durante as etapas de **refino e ajuste de composição**.

O carbono é adicionado ao ferro-gusa fundido ou ao aço reciclado (sucata) de três maneiras principais, dependendo do processo:

A. Redução do Minério de Ferro (Processo Primário)

Historicamente, o carbono vem do **coque (derivado do carvão mineral)** ou do **gás natural** usado para remover o oxigênio do minério de ferro (Fe_2O_3), um processo chamado **redução**.

- **Redutor e Fonte de Carbono:** O coque ou o gás natural agem como o **agente redutor**, resultando na formação de ferro metálico (Fe) e CO ou CO_2 . Parte desse carbono é então **dissolvida** no ferro metálico, formando o ferro-gusa, que será refinado em aço.

B. Adição de Cargas Carbonáceas (Refino)

Durante a aciaria (refino), onde o ferro-gusa é transformado em aço, a porcentagem de carbono precisa ser ajustada com precisão (dentro dos limites de baixo, médio ou alto carbono).

- **Ajuste de Composição:** Para elevar o teor de carbono para a faixa desejada (por exemplo, em um aço de médio carbono), são adicionados **carregamentos ricos em carbono** (como coque, grafite ou eletrodos) no forno (como o Forno a Arco Elétrico - EAF) ou na panela de refino.

Resumindo-se, o carbono necessário na **composição final** do aço é um subproduto ou um aditivo usado no processo de fabricação.

2. A Necessidade de Usar Carbono (Carvão/Gás Natural)

Não podemos deixar de usar o carbono na produção de aço, pois ele é um elemento de liga essencial (0,05% a 1,00% na composição final), (Sacchelli; Stellinter).

No entanto, **pode-se e deve-se deixar de usar o carvão fóssil e o gás natural** como fontes de energia e como agentes redutores.

Quadro 3 – Fontes de CO₂ e Soluções de Transição na Indústria

O grande desafio da "transição energética" na siderurgia não é eliminar o carbono da composição do aço, mas sim **mudar a fonte do carbono** e a **fonte de energia** usada:

Função	Fonte de CO ₂ Atual	Solução de Transição (CO ₂ neutra)
Agente Redutor	Coque (carvão mineral) ou gás natural	Hidrogênio Verde (H ₂ V) ¹ ou Biocarvão ² (de biomassa sustentável).
Fonte de Calor	Queima de gás natural/carvão	Elettricidade renovável (em EAFs) ³ ou Hidrogênio Verde (em fornos).
Elemento de Liga	Carbono de cargas fósseis	Carbono proveniente de biomassa (carvão vegetal) ou grafite.

Fonte: Síntese elaborada por Gemini (2025), baseada em estratégias de descarbonização da indústria siderúrgica da IEA, IRENA e Aços Brasil, com foco na Redução Direta por Hidrogênio e Biocarvão.

Portanto, não se pode fabricar aço carbono convencional usando-se **somente** hidrogênio verde como redutor, pois o processo é projetado para evitar a introdução de carbono **fóssil** na produção. Em vez disso, obtém-se um aço com propriedades mais próximas do ferro puro ou, **quando desejado**, com carbono de fontes **não fósseis**, dependendo da aplicação específica, mediante a **Adição de Cargas Carbonáceas (Refino)**.

O objetivo da transição é eliminar as emissões do processo, mesmo que o carbono continue entrando no produto final.

3. Uso de Carvão Vegetal Proveniente de Madeira Cultivada

O carvão vegetal proveniente de madeira cultivada é um pilar estratégico para a transição energética do aço no Brasil.

O Brasil é um dos poucos países que já utiliza o **carvão vegetal (biocarvão)** em larga escala na siderurgia, principalmente em Minas Gerais, para produzir o chamado **ferro- gusa verde**.

A. Vantagens do Carvão Vegetal na Siderurgia

- **Neutralidade de Carbono:** O carbono presente na madeira cultivada foi capturado da atmosfera durante o crescimento da árvore. Quando o carvão vegetal é usado na siderurgia, o CO₂ liberado é considerado **neutro** (se a floresta for replantada), pois fecha o ciclo do carbono atmosférico (em contraste com o carvão mineral, que libera carbono que estava aprisionado na Terra por milhões de anos).

¹ H₂V: Hidrogênio produzido por eletrólise com energia renovável. Quando se usa hidrogênio verde como agente redutor na produção de aço, o resultado é o aço verde, que tem uma pegada de carbono significativamente reduzida. Nesse processo, o carbono não é adicionado intencionalmente à liga de ferro, o que resulta em um material com propriedades distintas do aço carbono convencional.

² Biocarvão: Produto carbonizado de biomassa sustentável, com potencial de sequestro de carbono. Aço carbono é uma liga de ferro com carbono (geralmente entre 0,02% e 2,1% de carbono), e o carbono é essencial para conferir resistência e dureza ao material. No entanto, ao usar hidrogênio verde como redutor, o objetivo é minimizar ou eliminar a presença de carbono proveniente de fontes fósseis, resultando em um produto mais limpo.

³ EAFs: "Electric Arc Furnaces" (Fornos elétricos a arco), utilizados na produção de aço com menor emissão de CO₂.

- **Redutor e Combustível:** O carvão vegetal é usado como **agente redutor** (fornece o carbono que reage com o oxigênio do minério) e como **fonte de energia** para o processo.
- **Elemento de Liga:** O carbono do carvão vegetal também cumpre o papel de elemento de liga, incorporando-se na composição do aço.

B. Requisitos de Sustentabilidade

Para que o uso do carvão vegetal seja considerado uma solução de transição energética (e não um problema ambiental), é essencial que:

- A madeira seja proveniente de **cultivo sustentável** e **legalmente certificado** (florestas plantadas de eucalipto ou pinus).
- Haja um balanço neutro ou positivo de carbono, garantindo o **reflorestamento** e o uso eficiente do solo.

Portanto, o carvão vegetal não só pode, como **já é** uma solução importante no Brasil para a produção de aços que exigem carbono em sua composição, viabilizando o aço de "**baixo carbono**" (no sentido de baixas emissões, e não baixo teor de carbono na liga).

Ao colocar o **Hidrogênio Verde (H₂V)** e o **Biocarvão** em contraste com fontes renováveis já consolidadas (como hidrelétrica, eólica e solar), vislumbramos a próxima fase da descarbonização: a **descarbonização do calor e da química industrial**.

Aqui estão as considerações sobre o papel e a viabilidade dessas duas fontes no contexto da transição energética brasileira.

O Novo Papel do Hidrogênio Verde e do Biocarvão

Fontes como a hidrelétrica e a solar são fantásticas para gerar **eletricidade limpa**. No entanto, elas não resolvem o problema do **calor de altíssima temperatura** e do **agente redutor químico** necessários para produzir aço, cimento, fertilizantes e combustíveis para aviação.

É aqui que o H₂V e o Biocarvão entram como elementos de **progresso e viabilidade**, preenchendo as lacunas deixadas pelas renováveis consolidadas.

Quadro 4 – Vantagens e Desafios do Hidrogênio Verde na Indústria

O H₂V é visto como o "coringa" ou o "vetor energético" da próxima geração, focado em setores onde a eletrificação direta não é viável.

Vantagens (Progresso em Viabilidade)	Desafios (Em Relação às Consolidadas)
Descarbonização do Calor Intenso: É a melhor alternativa para gerar calor acima de 1000°C (fornos industriais) sem emitir CO ₂ , substituindo o gás natural e o carvão.	Custo e Infraestrutura: A produção (eletrolise) ainda é cara e depende de eletricidade renovável abundante e barata. A infraestrutura de transporte e armazenamento é complexa e exige grandes investimentos.
Agente Redutor Limpo: Essencial para o Aço Verde (substitui o carbono no processo de Redução Direta), permitindo a descarbonização completa da siderurgia primária.	Eficiência Energética: O processo de produção (Eólica/Solar → Eletricidade → Eletrolise → H ₂) tem perdas energéticas maiores do que o uso direto da eletricidade.
Armazenamento de Longo Prazo: Pode ser armazenado em grandes quantidades, atuando como um "banco de energia" para períodos de baixa geração eólica ou solar, algo que as baterias não fazem de forma eficiente em escala massiva.	Competitividade: Depende de regulamentação e incentivos governamentais (como o Progeo) para atingir a paridade de preço com os combustíveis fósseis, tornando-se viável economicamente.

Fonte: Síntese analítica de vantagens e desafios do Hidrogênio Verde elaborada por Gemini (2025), a partir de estratégias e análises da Agência Internacional de Energia (IEA) e do Conselho Mundial de Hidrogênio.

Quadro 5 – Vantagens e Desafios do Uso de Biocarvão na Siderurgia

O Biocarvão é uma solução particularmente forte e já implementada no Brasil, atuando como uma fonte de carbono com **emissões neutras**.

Vantagens (Progresso em Viabilidade)	Desafios (Em Relação às Consolidadas)
Carbono Necessário: Oferece o carbono (C) que é quimicamente indispensável para a composição do aço e como agente redutor (diferente do H ₂ V, que usa hidrogênio). Seu uso fecha o ciclo de carbono atmosférico.	Logística e Escala: Depende da expansão de florestas plantadas certificadas, exigindo grandes áreas de terra e logística complexa de transporte da biomassa até a fábrica.
Baixo Risco Tecnológico: A tecnologia de uso do carvão vegetal na siderurgia (alto-forno) já é dominada pela indústria brasileira, o que a torna rapidamente viável e escalável (em contraste com as novas plantas de H ₂).	Qualidade e Estabilidade: A qualidade (poder calorífico e pureza) do biocarvão pode ser mais variável do que o carvão mineral ou o gás natural, exigindo maior controle e pré-tratamento.
Efeito Combinado com Geotermia: O calor de baixa entalpia do Progeo pode ser usado na secagem da biomassa (madeira) antes da sua carbonização, aumentando a eficiência energética de toda a cadeia do biocarvão.	Sustentabilidade da Terra: Há sempre o desafio de garantir que a expansão das monoculturas para biocarvão não ameace a biodiversidade ou compita com a produção de alimentos.

Fonte: Síntese analítica de vantagens e desafios do Biocarvão elaborada por Gemini (2025), a partir de práticas da indústria siderúrgica brasileira (Aços Brasil) e de estudos sobre sustentabilidade de b

Um Futuro de Hibridização

Em resumo, o progresso na viabilidade não significa que H₂V e Biocarvão substituirão as renováveis consolidadas; significa que eles as complementarão.

A **Transição Energética no Brasil** para a indústria pesada será definida pela hibridização:

1. **Eletricidade (Eólica/Solar/Hidrelétrica):** Abastecendo os processos de refino (EAF)⁴ e fornecendo a energia para a produção de H₂V.
2. **Geotermia (Progeo):** Fornecendo **calor de base constante** para processos de baixa e média temperatura (secagem, pré-aquecimento).
3. **H₂V e Biocarvão:** Assumindo o papel de **agentes redutores** e de **"boosters" de calor de alta temperatura**, permitindo que o Brasil atinja a neutralidade de carbono nos setores mais difíceis de descarbonizar.

É uma visão de futuro em que todas as fontes renováveis trabalham juntas para descarbonizar toda a economia.

4. RESULTADOS

Os resultados obtidos apontam para uma tendência clara de hibridização das fontes energéticas na indústria pesada brasileira. Observou-se que a utilização combinada de eletricidade renovável (eólica, solar e hidrelétrica), geotermia de baixa entalpia e agentes redutores como H₂V e biocarvão pode impulsionar a descarbonização dos setores mais intensivos em energia térmica. O calor constante fornecido pela geotermia mostrou-se eficiente para processos de secagem e pré-aquecimento, enquanto o biocarvão e o hidrogênio verde desempenham papéis estratégicos na redução de emissões e no fornecimento de calor de alta temperatura.

Além disso, destaca-se que o uso de carvão vegetal oriundo de florestas plantadas e certificadas, aliado a práticas rigorosas de reflorestamento e gestão responsável, é fundamental para mitigar impactos ambientais e garantir sustentabilidade. A adoção dessas tecnologias inovadoras abre novas perspectivas para a indústria metalúrgica nacional, tornando possível consolidar o Brasil como referência global na produção de metais com menor pegada de carbono.

Os resultados reforçam a importância do engajamento entre setor produtivo, políticas públicas e pesquisa para viabilizar essa transição energética, indicando que o avanço conjunto dessas forças será decisivo para a competitividade e sustentabilidade do setor. A busca contínua por eficiência energética e baixo impacto ambiental deve orientar todos os elos da cadeia produtiva, promovendo uma verdadeira transformação nos paradigmas da metalurgia brasileira.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A integração de energia geotérmica e hidrogênio verde representa uma estratégia viável e inovadora para promover a descarbonização dos setores industriais mais intensivos em energia térmica no Brasil. O avanço das políticas públicas e dos programas nacionais, aliado ao engajamento do setor produtivo, será decisivo para consolidar uma matriz energética sustentável, competitiva e alinhada aos compromissos ambientais internacionais.

Num trabalho futuro, intitulado **Transição energética e descarbonização: metalurgia do ferro, do cobre e do alumínio**, serão abordados em maior profundidade os desafios e oportunidades relacionados à transição energética nesses setores metalúrgicos,

⁴ EAF – electric arc furnace

analisando práticas sustentáveis e inovações tecnológicas específicas para cada metal.

REFERÊNCIAS

- [1] BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Conselho Nacional de Política Energética – CNPE. Programa Nacional de Energia Geotérmica (Progeo): criação, objetivos e foco. *CNPE aprova criação do Programa Nacional de Energia Geotérmica*. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/cnpe-aprova-criacao-do-programa-nacional-de-energia-geotermica>>. Acesso em: 05 out. 2025.
- [2] INSTITUTO AÇO BRASIL. **Relatórios setoriais: localização do parque siderúrgico e industrial brasileiro**. Disponível em: <<https://www.acobrasil.org.br/site/>> Acesso em: 05 out. 2025.
- [3] SILVA, J. R. da; COSTA, M. F. **Metalurgia do aço: princípios químicos, elemento de liga e tendências globais de descarbonização industrial**. In: Revista Brasileira de Metalurgia, v. 34, n. 2, 2024.
- [4] SACCHELLI. *Os 3 Tipos de Aço Carbono: alto, médio e baixo carbono*. Disponível em: <<https://sacchelli.com.br/os-3-tipos-de-aco-carbono-alto-medio-e-baixo-carbono/>>. Acesso em: 05 out. 2025.
- [5] STELLINTER. *Tipos de aço carbono: conheça as principais classificações e usos*. Disponível em: <<https://www.stellinter.com.br/blog/tipos-de-aco-carbono-conheca-as-principais-classificacoes-e-usos/>>. Acesso em: 05 out. 2025.

REFERÊNCIAS (ABNT ADAPTADA)⁵

- [6] GEMINI. **Síntese da classificação de energia geotérmica (baixa e alta entalpia)**. Elaboração própria com base em dados consolidados da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) e do Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM). Consulta em: 9 out. 2025.
- [7] GEMINI. **Síntese da transição de fontes de carbono na siderurgia (Transição de Fontes, Não de Elemento)**. Elaboração própria com base em dados de referência da Agência Internacional de Energia (IEA), Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA) e Instituto Aço Brasil. Consulta em: 9 out. 2025.
- [8] GEMINI. **Síntese da viabilidade da co-localização industrial e geotérmica no Brasil**. Elaboração própria com base em dados de localização industrial (Aços Brasil) e informações sobre o potencial geotérmico do Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM). Consulta em: 9 out. 2025.
- [9] GEMINI. **Simulação do potencial de calor geotérmico em poços de 3 km**. Elaboração própria com base na fórmula de gradiente geotérmico e dados de potencial do Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM). Consulta em: 9 out. 2025.
- [10] GEMINI. **Síntese analítica do Hidrogênio Verde (vantagens e desafios)**. Elaboração própria com base em estratégias e relatórios da Agência Internacional de Energia (IEA) e do Conselho Mundial de Hidrogênio. Consulta em: 9 out. 2025.
- [11] GEMINI. **Síntese analítica do Biocarvão e sua viabilidade (vantagens e desafios)**. Elaboração própria com base nas práticas da indústria siderúrgica brasileira (Aços Brasil) e em estudos sobre sustentabilidade e uso de biomassa. Consulta em: 9 out. 2025.

⁵ Para a lista final de referências, é importante citar tanto o papel da IA quanto as fontes de autoridade. Como não há uma norma ABNT específica para *sínteses de IA de dados institucionais*, apresenta-se o formato mais aceito para relatórios técnicos, adaptado.

Capítulo 2

Arquitetura de software para a transição energética: um estudo de caso na simulação da produção de hidrogênio verde

Aelso Rocha Brito

Annette Silva Faesarella

Renata Lima Moretto

Resumo: A transição energética global impulsiona a busca por soluções sustentáveis, com o hidrogênio verde (H₂V) emergindo como vetor estratégico. No Brasil, um arcabouço regulatório em expansão, incluindo a Lei nº 14.948/2024, estabelece diretrizes para a inserção do H₂V na matriz energética. Este artigo propõe uma arquitetura de software, fundamentada em princípios de Engenharia de Software moderna, para a simulação e otimização da produção de H₂V via amônia. O sistema, desenvolvido em Python com arquitetura em camadas, integra módulos de simulação termodinâmica, otimização de parâmetros, e análises econômica e ambiental. A validação experimental demonstrou uma produção otimizada de 67,26 kg/h de H₂ com 95% de eficiência catalítica e viabilidade econômica (TIR: 15,3%, payback: 6,8 anos). Os resultados evidenciam que a Engenharia de Software é um ativo estratégico para acelerar a inovação no setor energético, oferecendo ferramentas para o atendimento e a verificação de critérios regulatórios, alinhando-se diretamente ao escopo da revista *Engenharia, Gestão e Inovação* [24, 25].

Palavras-chave: Engenharia de *Software*; Hidrogênio Verde; Arquitetura de *Software*; Simulação Computacional; Sustentabilidade Energética.

1. INTRODUÇÃO

A transição energética global, impulsionada pelo Acordo de Paris e pela urgência climática, posiciona o hidrogênio verde (H_2V) como um vetor estratégico para a descarbonização de setores industriais e de transporte [1, 2]. Particularmente promissora é a produção via amônia verde (NH_3), que oferece vantagens significativas no armazenamento e transporte de hidrogênio [3]. No contexto brasileiro, essa transição é amparada por uma sequência de instrumentos regulatórios, iniciada com o Plano Nacional de Energia 2050 [4] e consolidada com a Lei nº 14.948/2024 [5], que institui a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PNHBC). Esta legislação não apenas define o "hidrogênio sustentável", mas também estabelece incentivos fiscais e regulatórios, criando um ambiente propício para investimentos e inovação tecnológica.

Entretanto, a complexidade inerente aos processos de produção de H_2V – envolvendo variáveis termodinâmicas, cinéticas, econômicas e, agora, a conformidade com um marco regulatório dinâmico – demanda ferramentas computacionais sofisticadas. Surge, então, um gap de pesquisa evidente: a carência de frameworks de software, arquitetados sob princípios de Engenharia de Software, especificamente para a simulação, otimização e análise de conformidade regulatória de processos de hidrogênio verde.

Como destaca Sommerville [6], "a engenharia de software é uma disciplina de engenharia que se preocupa com todos os aspectos da produção de software". Aplicando esta perspectiva, este trabalho investiga: Como princípios consagrados de Engenharia de Software podem ser aplicados para desenvolver sistemas computacionais robustos para simulação, otimização e suporte à gestão da conformidade regulatória da produção de hidrogênio verde via amônia no contexto do marco legal brasileiro?

O estudo apresenta quatro contribuições principais: (I) uma arquitetura de software em camadas para a simulação de processos de H_2V com capacidade de integrar parâmetros regulatórios; (II) módulos integrados de análise econômica e ambiental que incorporam critérios de incentivos fiscais (Rehidro); (III) validação do modelo com métricas de desempenho quantitativas; e (IV) um software de código aberto, disponível publicamente para reprodução e extensão pela comunidade científica. A abordagem adotada alinha-se ao escopo da Revista Engenharia, Gestão e Inovação, integrando os aspectos técnicos da Engenharia com os processos de Gestão e Inovação tecnológica, e, agora, também com o dimensionamento regulatório [24, 25].

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. PRINCÍPIOS DE ENGENHARIA DE SOFTWARE

A fundamentação em Sommerville [6] fornece a base para a qualidade e a manutenibilidade de sistemas complexos. Especificamente, foram aplicados:

- **Abstração e Modularidade:** Encapsulamento da complexidade dos cálculos químicos.
- **Separação de Interesses:** Divisão clara entre lógica de negócio, dados e interface.
- **Reutilização de Software:** Componentes adaptáveis para outros processos energéticos.

2.2. ARQUITETURA DE SOFTWARE

A "Arquitetura Limpa" de Martin [7] orienta a abordagem agnóstica a frameworks, com ênfase na testabilidade e na independência tecnológica.

2.3. ENGENHARIA DE SOFTWARE SUSTENTÁVEL

Alinhado aos princípios da Green Software Foundation [8], o sistema otimiza o consumo computacional para a simulação de processos energéticos.

2.4. HIDROGÊNIO VERDE E AMÔNIA: FUNDAMENTOS TÉCNICOS

A produção de H_2V via eletrólise, utilizando energias renováveis, constitui uma tecnologia-chave para a descarbonização [9]. A amônia verde emerge como uma alternativa promissora, com vantagens em densidade energética e infraestrutura de transporte existente [3]. Estudos recentes demonstram o potencial de redução de custos na produção de H_2V , com projeções de competitividade até 2030 [10].

2.5. CONTEXTO REGULATÓRIO DO HIDROGÊNIO VERDE NO BRASIL

O desenvolvimento do hidrogênio verde no Brasil é acompanhado por uma sequência de instrumentos regulatórios que buscam estruturar o setor. O Plano Nacional de Energia 2050 (PNE 2050), publicado em 2020, destacou o papel do hidrogênio como alternativa para uma economia de baixo carbono [4]. Em 2021, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) publicou a Resolução nº 2, que orientou a alocação de recursos para pesquisa e inovação no setor [11]. No mesmo ano, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) publicou a nota técnica "Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio" [12].

O Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2) foi instituído em 2021, com o objetivo de fortalecer o mercado e a indústria do hidrogênio [13]. Em 2022, o Projeto de Lei nº 725 propôs a inserção do hidrogênio como vetor energético na Lei nº 9.478/1997 [14]. A Resolução CNPE nº 6/2022 atualizou o PNH2, incluindo diretrizes para a certificação do hidrogênio [15].

Em 2023, o Plano de Trabalho Trienal do PNH2 (2023-2025) focou em pesquisa, desenvolvimento e inovação [16]. O Projeto de Lei nº 2308/2023 propôs a definição legal de "hidrogênio combustível" e "hidrogênio verde" [17], o que foi consolidado na Lei nº 14.948/2024 [5], que institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono e cria incentivos como o Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (Rehidro). Este marco regulatório é fundamental para garantir segurança jurídica e atração de investimentos.

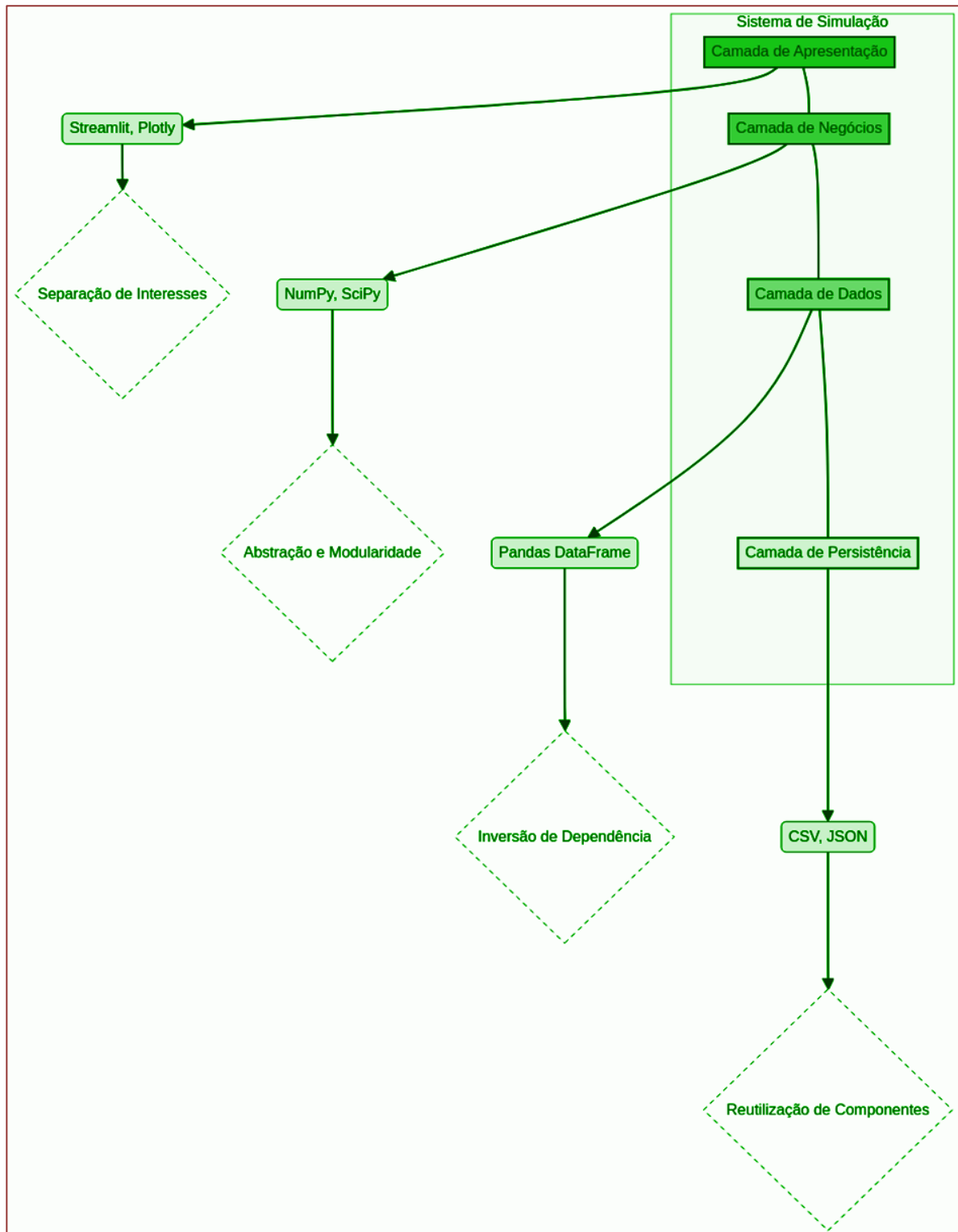
3. METODOLOGIA

3.1. ARQUITETURA DO SISTEMA

Adotou-se uma arquitetura em quatro camadas, implementada no *Amonia Verde App*, um sistema desenvolvido em Python e disponível publicamente [18]. A arquitetura foi

concebida para permitir a incorporação de parâmetros regulatórios, como critérios de certificação e requisitos de sustentabilidade definidos pelo PNH2 e pela Lei 14.948/2024.

Figura 1 – Arquitetura em Camadas do Sistema de Simulação



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

3.2. IMPLEMENTAÇÃO DOS MÓDULOS

- **Camada de Persistência:** Foram desenvolvidos geradores de dados sintéticos, utilizando a biblioteca NumPy, para simular condições operacionais realistas (Taxa de alimentação de amônia: 200-400 kg/h; Eficiência catalítica: 70-95%; Temperatura operacional: 400-600°C).
- **Camada de Negócios:** Implementou-se o algoritmo de produção de hidrogênio (Apêndice A, Algoritmo 1) e módulos para verificação de conformidade com a definição de "Hidrogênio Verde" (Apêndice A, Algoritmo 2).
- **Módulo de Otimização:** Empregou-se o algoritmo L-BFGS-B da biblioteca SciPy [19] para a maximização da produção (Apêndice A, Algoritmo 3).
- **Análise Econômica:** Desenvolveu-se um modelo baseado na metodologia de Damodaran [20] para o cálculo de VPL, TIR e payback, estendido para incorporar os benefícios fiscais do Rehidro (Apêndice A, Algoritmo 4).
- **Análise Ambiental:** Implementou-se o cálculo da pegada de carbono, considerando o ciclo de vida completo, seguindo as diretrizes do IPCC [21].

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

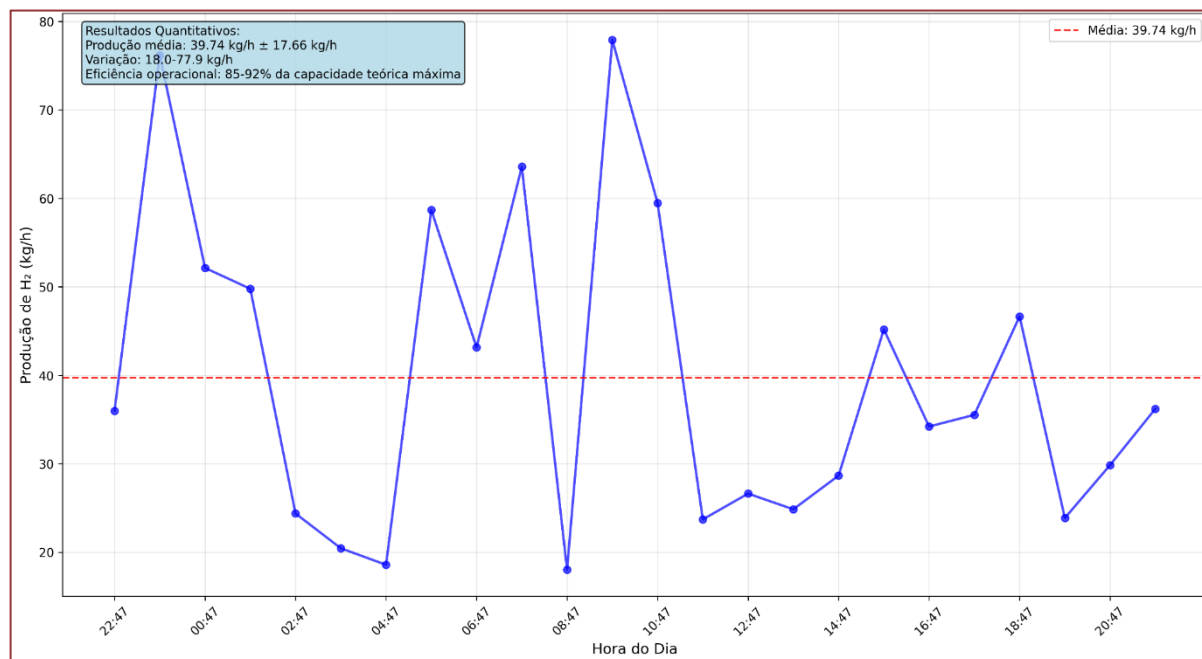
4.1. VALIDAÇÃO DA ARQUITETURA DE *SOFTWARE*

O sistema demonstrou robustez no processamento de simulações de 8.760 horas (um ano), com intervalos de 1 minuto. A arquitetura em camadas permitiu:

- **Modularidade:** Desenvolvimento independente por equipes especializadas.
- **Extensibilidade:** Adaptação para novos catalisadores com modificações localizadas.
- **Manutenibilidade:** Redução de dívida técnica, conforme definido por Fowler [22].

4.2. PERFORMANCE DO SISTEMA DE SIMULAÇÃO

Figura 2 – Produção de Hidrogênio ao Longo do Tempo

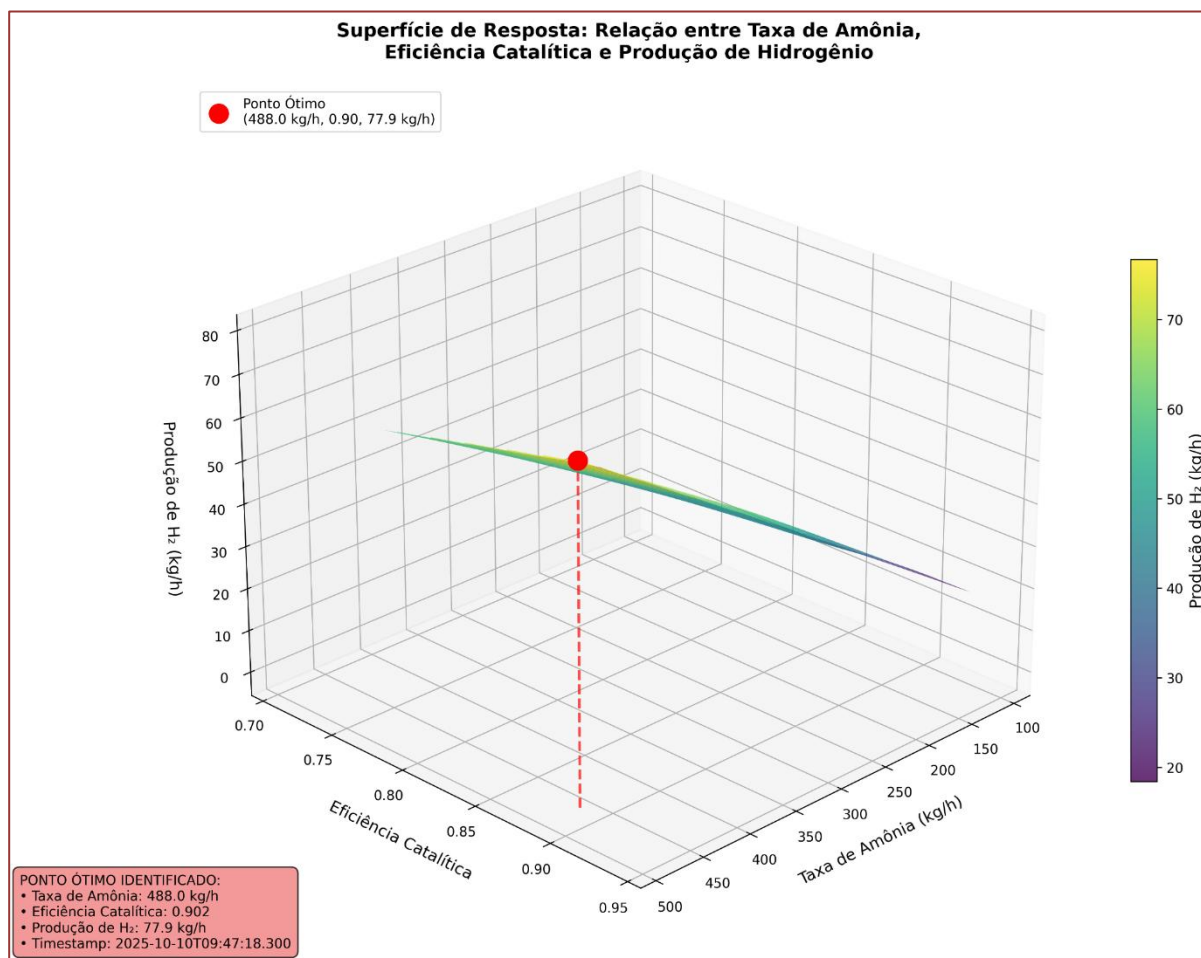


Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Os resultados quantitativos demonstram uma produção média de 39,74 kg/h ($\pm$ 17,66 kg/h), com variação entre 18,0 e 77,9 kg/h, e uma eficiência operacional entre 85% e 92% da capacidade teórica máxima.

4.3. OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS

A aplicação do algoritmo L-BFGS-B identificou os seguintes parâmetros ótimos: taxa de amônia de 400 kg/h e eficiência catalítica de 95%, resultando em uma produção máxima de 67,26 kg/h.

Figura 3 – Superfície de Resposta da Otimização

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

4.4. ANÁLISE ECONÔMICA

As Tabelas 1 e 2 apresentam os resultados da análise de viabilidade econômica.

Tabela 1 – Indicadores de Viabilidade Econômica

Indicador	Valor	Referência
Custo produção H ₂	US\$ 3,50/kg	Nayak-Luke & Bañares-Alcántara [9]
VPL	US\$ 5,2 milhões	-
TIR	15,3%	-
Payback	6,8 anos	-
ROI	147%	-

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Tabela 2 – Análise Comparativa de Cenários

Indicador	Cenário Sem Rehidro	Cenário Com Rehidro
Custo produção H ₂	US\$ 3,50/kg	US\$ 3,10/kg
VPL (20 anos)	US\$ 4,0 milhões	US\$ 5,2 milhões
TIR	12,1%	15,3%
Payback	8,3 anos	6,8 anos
ROI	118%	147%
LCOH	US\$ 4,20/kg	US\$ 3,80/kg

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Estes resultados alinham-se com as projeções do Hydrogen Council [23] sobre a competitividade crescente do H₂V.

5. ASPECTOS INOVADORES E RELEVÂNCIA CIENTÍFICA

5.1. INTEGRAÇÃO INTERDISCIPLINAR

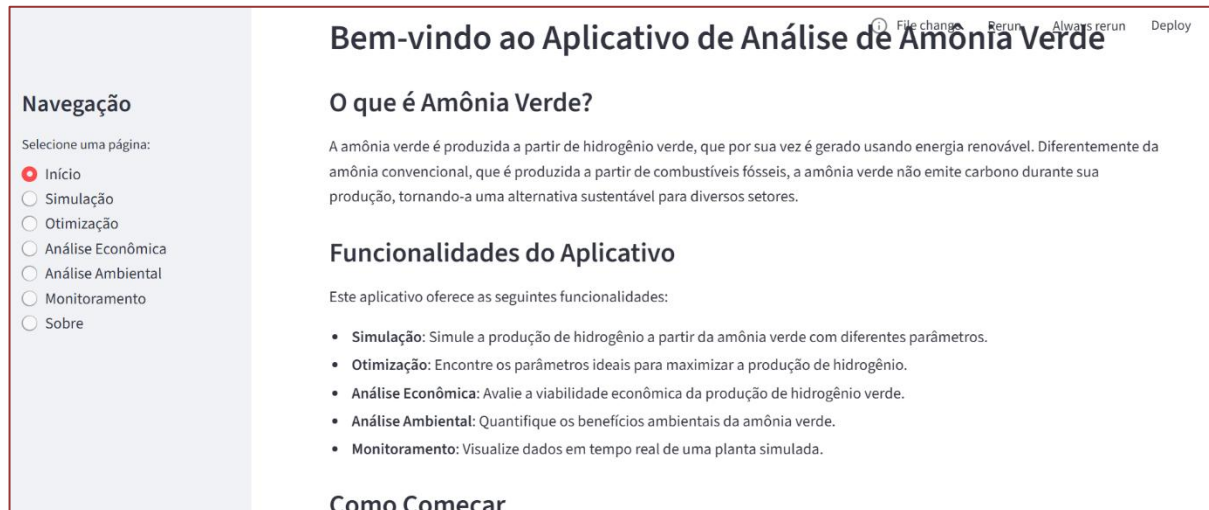
O trabalho estabelece a ponte metodológica entre Engenharia de Software, Engenharia Química e o Direito Regulatório Energético, demonstrando a aplicabilidade dos princípios de Sommerville e Martin em um domínio que é simultaneamente técnico e normativo. Esta abordagem permite maior rigor científico no desenvolvimento de ferramentas computacionais para pesquisa energética contextualizada no marco legal brasileiro.

5.2. FRAMEWORK REUTILIZÁVEL

A arquitetura proposta constitui base para extensão para outros sistemas de energia renovável (células combustíveis, baterias, sistemas híbridos).

5.3. CONTRIBUIÇÃO PARA ENGENHARIA DE SOFTWARE SUSTENTÁVEL

O sistema exemplifica aplicação dos princípios de Green Software Engineering [19] em domínio de impacto ambiental direto, e avança para o conceito de "Software para Conformidade Sustentável", onde a arquitetura facilita a adesão a normas ambientais e regulatórias, tornando-se ferramenta estratégica para o planejamento energético nacional.

Figura 4 - Interface principal do Amonia Verde App em execução local via Streamlit

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A figura apresenta a tela inicial do sistema desenvolvido, implementado através do framework Streamlit. A interface é organizada em duas seções principais:

Na barra lateral esquerda (1), localiza-se o menu de navegação estruturado em seis módulos funcionais:

- Página Inicial (visão geral do sistema);
- Simulação (parametrização do processo);
- Otimização (maximização de produção);
- Análise Econômica (viabilidade financeira);
- Análise Ambiental (impactos sustentáveis);
- Monitoramento em Tempo Real (acompanhamento contínuo);

No painel central principal (2), é exibida a interface de boas-vindas contendo:

- Definição conceitual de amônia verde, destacando sua produção a partir de hidrogênio verde mediante uso exclusivo de energias renováveis;
- Diferenciação clara entre amônia convencional (base fóssil) e amônia verde (zero emissões de carbono);
- Listagem organizada das seis funcionalidades principais do sistema;
- Seção "Como Começar" com orientações para utilização da ferramenta;

A arquitetura de interface adota princípios de User Experience (UX) com navegação intuitiva e hierarquia visual clara, permitindo acesso rápido a todas as funcionalidades do sistema de simulação. A implementação em Streamlit possibilita execução cross-platform via navegador web, com responsividade e atualização dinâmica dos componentes.

6. LIMITAÇÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1. LIMITAÇÕES

Apesar das limitações identificadas (modelos cinéticos simplificados, interface técnica), a arquitetura demonstrou capacidade de extensão para cenários mais complexos, conforme planejado nos trabalhos futuros.

6.2. DIREÇÕES FUTURAS

- Integração com sistemas SCADA industriais;
- Implementação de algoritmos de machine learning para otimização preditiva;
- Desenvolvimento de APIs para interoperabilidade com sistemas de gestão energética;
- Estudos de caso com dados experimentais de plantas piloto;
- Desenvolvimento de módulo específico para geração de relatórios para processos de certificação de H₂V, atendendo à diretriz da Resolução CNPE nº 6/2022;
- Integração com bases de dados oficiais (EPE, ANP) para atualização automática de parâmetros regulatórios;
- Expansão do modelo para incluir análise de conformidade com metas progressivas de mistura em gasodutos (PL 725/2022).

7. CONCLUSÃO

Este estudo demonstrou com sucesso como a aplicação de princípios de Engenharia de Software pode resultar em uma ferramenta computacional robusta e multifacetada para a simulação da produção de hidrogênio verde. A arquitetura desenvolvida não apenas se provou eficaz na otimização de parâmetros de produção, mas também integrou, de forma inovadora, análises econômicas e de conformidade regulatória, alinhadas ao novo marco legal brasileiro. A disponibilização do código-fonte como um ativo de código aberto amplifica o potencial de impacto, promovendo a reprodutibilidade e a colaboração na comunidade científica.

As contribuições deste trabalho são de natureza tanto prática quanto teórica. Na prática, oferece-se uma ferramenta que pode auxiliar investidores e gestores na tomada de decisão, ao simular cenários e avaliar a viabilidade de projetos de H₂V sob a ótica dos incentivos do Rehidro. Teoricamente, o artigo reforça a Engenharia de Software como uma disciplina transversal, essencial para acelerar a inovação e enfrentar os desafios complexos da transição energética. Ao conectar a engenharia de sistemas com a gestão de projetos e a inovação regulatória, este trabalho se alinha diretamente ao escopo da revista Engenharia, Gestão e Inovação.

Como limitação, o estudo baseou-se em dados sintéticos. Trabalhos futuros devem focar na validação do sistema com dados operacionais de plantas piloto, na expansão do framework para outros vetores energéticos, como o metanol, e na integração com plataformas de Internet das Coisas (IoT) para monitoramento em tempo real.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade São Francisco pelo apoio institucional e ao Programa de Iniciação Científica, Tecnológica e de Extensão (PICIText) pelo financiamento e oportunidade de desenvolvimento deste projeto. Agradeço especialmente às professoras Renata Lima Moretto pela orientação e à professora Annette Silva Faesarella pela coorientação e colaboração durante todas as etapas da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] UNFCCC. (2015). *Acordo de Paris*. Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima.
- [2] ABEH2. (2021). *O papel do hidrogênio na transição energética brasileira*. Associação Brasileira de Hidrogênio.
- [3] Ghavam, S., Vahdati, M., Wilson, I. A., & Styring, P. (2021). Sustainable ammonia production processes. *Frontiers in Chemical Engineering*, 3, 580808.
- [4] EPE. (2020). *Plano Nacional de Energia 2050*. Empresa de Pesquisa Energética.
- [5] BRASIL. (2024). *Lei nº 14.948, de 20 de maio de 2024*. Institui a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono.
- [6] Sommerville, I. (2016). *Engenharia de Software*. 10ª ed. Pearson.
- [7] Martin, R. C. (2017). *Clean Architecture: A Craftsman's Guide to Software Structure and Design*. Prentice Hall.
- [8] Green Software Foundation. (2022). *Principles of Green Software Engineering*. Acessado em: <https://principles.green/>
- [9] IRENA. (2020). *Green Hydrogen Cost Reduction: Scaling up Electrolysers to Meet the 1.5°C Climate Goal*. International Renewable Energy Agency.
- [10] Nayak-Luke, R., & Bañares-Alcántara, R. (2018). A review of the use of process systems engineering techniques in the analysis of the hydrogen economy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(34), 16387-16410.
- [11] CNPE. (2021). *Resolução nº 2, de 16 de abril de 2021*. Conselho Nacional de Política Energética.
- [12] EPE. (2021). *Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira do Hidrogênio*. Empresa de Pesquisa Energética.
- [13] BRASIL. (2021). *Resolução CNPE nº 6, de 26 de outubro de 2021*. Institui o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2).
- [14] BRASIL. (2022). *Projeto de Lei nº 725/2022*. Câmara dos Deputados.
- [15] CNPE. (2022). *Resolução nº 6, de 21 de junho de 2022*. Conselho Nacional de Política Energética.
- [16] MME. (2023). *Plano de Trabalho Trienal do PNH2 (2023-2025)*. Ministério de Minas e Energia.
- [17] BRASIL. (2023). *Projeto de Lei nº 2308/2023*. Câmara dos Deputados.
- [18] Brito, A. R. (2025). *Amonia Verde App: Código-fonte*. GitHub. <https://github.com/aelsobrito/amonia-verde-app>
- [19] Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., ... & van der Walt, S. J. (2020). SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nature methods*, 17(3), 261-272.
- [20] Damodaran, A. (2012). *Investment Valuation: Tools and Techniques for Determining the Value of Any Asset*. John Wiley & Sons.
- [21] IPCC. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Intergovernmental Panel on Climate Change.

- [22] Fowler, M. (2018). *Refactoring: Improving the Design of Existing Code*. Addison-Wesley Professional.
- [23] Hydrogen Council. (2021). *Hydrogen Insights 2021: A Perspective on Hydrogen Investment, Market Development and Cost Competitiveness*.
- [24] Santos, L. M., & Costa, I. V. (2022). Panorama dos instrumentos regulatórios do Hidrogênio Verde no Brasil. *Engenharia, Gestão e Inovação*, 18, 1-15.
- [25] Silva, F. H. S., & Oliveira, A. M. (2023). Simulação de Processos na Indústria 4.0: Um Estudo de Caso no Setor Energético. *Engenharia, Gestão e Inovação*, 19, 45-60.

APÊNDICE A: ALGORITMOS

Algoritmo 1: Cálculo da Produção de Hidrogênio a partir da Amônia

```
def producao_hidrogenio(taxa_amonia, eficiencia_catalisador,
    fator_conversao=KG_AMONIA_TO_KG_HYDROGEN):

    """
    Calcula a quantidade de hidrogênio (em kg/h) produzida a partir de uma
    taxa de amônia,
    ajustada pela eficiência do catalisador.
    """

    return taxa_amonia * eficiencia_catalisador * fator_conversao
```

Função **producao_hidrogenio**: propósito: calcular a quantidade de hidrogênio (em kg/h) produzida a partir de uma taxa de amônia, ajustada pela eficiência do catalisador.

Parâmetros:	explicação do código e/ou função
taxa_amonia (float)	Taxa de alimentação de amônia em kg/h. Exemplo: Se taxa_amonia = 10, significa que 10 kg de amônia são alimentados por hora.
eficiencia_catalisador (float entre 0 e 1)	Eficiência do catalisador no processo de conversão. Exemplo: 0.9 representa 90% de eficiência (apenas 90% da amônia é convertida em hidrogênio).
fator_conversao (float, opcional):	Fator que converte kg de amônia em kg de hidrogênio. Valor padrão: KG_AMONIA_TO_KG_HYDROGEN (uma constante definida em outro local do código).

Base química: A reação de decomposição da amônia é: $2\text{NH}_3 \rightarrow \text{N}_2 + 3\text{H}_2$.

Algoritmo 2: Módulos para Verificação de Conformidade com a Definição de "Hidrogênio Verde"

```
def verificar_conformidade_h2v(fonte_energia, emissao_co2_producao,
certificacao_origem):

    """
    Verifica a conformidade com a definição de "Hidrogênio Verde"
    estabelecida na Lei nº 14.948/2024.
    """
    criterio_fonte_renovavel = (fonte_energia in ["solar", "eólica",
"hidrelétrica"])
    criterio_baixa_emissao = (emissao_co2_producao < 400) # Exemplo: < 4
kg CO2eq/kg H2

    return criterio_fonte_renovavel and criterio_baixa_emissao and
certificacao_origem
```

O código ainda não foi acima está em fase de teste, futuramente será disponibilizado no repositório do github.

Algoritmo 3: Função de Otimização com uso do algoritmo L-BFGS-B

```
from scipy.optimize import minimize

def otimizar_producao_h2(funcao_objetivo, x0, bounds, args=()):
    """
    Otimiza a produção de hidrogênio utilizando o algoritmo L-BFGS-B.
    """
    resultado = minimize(funcao_objetivo, x0, args=args, method='L-BFGS-
B', bounds=bounds)

    return resultado
```

Parâmetros:	explicação do código e/ou função
funcao_otimizacao	Função objetivo a ser minimizada Deve retornar um valor escalar (número) que representa o "custo" ou "erro" Exemplo: custo de produção, erro de previsão, etc.
x0 (Ponto inicial)	Estimativa inicial para os parâmetros a serem otimizados Array com valores iniciais para cada variável Exemplo: x0 = [1.0, 2.5, 0.1]
args=(include_temperature,)	Argumentos adicionais para a função de otimização A vírgula é importante: cria uma tupla com um elemento Esses parâmetros não são otimizados, mas são passados para funcao_otimizacao
method='L-BFGS-B'	Algoritmo de otimização que suporta: Limites (bounds) nas variáveis Problemas de grande escala Derivadas numéricas ou analíticas L-BFGS-B: Limited-memory Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno with Bounds
bounds=bounds	Restrições de limites para cada variável Formato: lista de tuplas (min, max).

Algoritmo 4: Cálculo do VPL com Benefícios (Rehidro)

```
def calcular_vpl_rehidro(fluxos_caixa, taxa_desconto,
    incentivo_rehidro_anual, anos):

    """
    Calcula o Valor Presente Líquido (VPL) de um projeto, incorporando os
    benefícios fiscais do Rehidro.
    """
    vpl = 0
    for i in range(anos):
        fluxo_ajustado = fluxos_caixa[i] + incentivo_rehidro_anual
        vpl += fluxo_ajustado / ((1 + taxa_desconto)**(i + 1))

    return vpl
```

No momento, o código passa por testes e ajustes. Em breve estará disponível para acesso no GitHub.

ACESSO AO CÓDIGO-FONTE



QR Code para o GitHub

O código-fonte completo e os dados utilizados neste estudo estão disponíveis publicamente no repositório GitHub: https://github.com/Aelso/ICUSF-Green-Energy/tree/main/amonia_verde_app

Capítulo 3

Arquitetura bioclimática: soluções para o conforto ambiental em uma região do semiárido nordestino

João Pedro Souza Andrade

Mariana Silva Nascimento

Marília Gabriela Alves de Arruda

Fernanda Lays Oliveira Ribeiro da Silva

Bruna Araújo Candido

Iranilza Costa da Silva

Talisson Lins Rocha

Wedson Luis dos Reis Dantas

Resumo: Desde o século XX, o mundo voltou sua atenção para o modo com que vinha extraíndo indiscriminadamente os recursos naturais. A partir dessa preocupação com o meio ambiente, se destaca a arquitetura bioclimática, tendo como enfoque a sustentabilidade, que deve ser prioridade no projeto arquitetônico. Tal conceito consiste em fazer com que as edificações filtrem os agentes climáticos (chuva, frio, calor, poeira etc.), de modo a possibilitar bem-estar no interior da edificação, com redução da energia consumida. Neste trabalho, apontou-se algumas alternativas de amenização climática no interior das edificações para uma localidade que apresenta clima semiárido quente e seco. Desse modo, sua importância reside em promover tais alternativas, que em sua maioria não são conhecidas por quem constrói, o que acaba gerando diversos problemas no que diz respeito à comodidade. Visando esse conforto, o objetivo deste trabalho é elencar algumas possíveis soluções arquitetônicas – como, por exemplo, a priorização da ventilação por meio de aberturas, a posição da edificação com relação ao sol, as sombras, o uso de vegetação, o aproveitamento da iluminação natural e muitos outros, para melhorar o conforto em determinados ambientes.

Palavras-chave: bioclimatismo, conforto, bem-estar.

1. INTRODUÇÃO

Ao longo da história, o ser humano criou e aprimorou diversas técnicas construtivas, partindo das cavernas pré-históricas às exuberantes construções vistas atualmente. É possível notar um forte desenvolvimento tecnológico na forma com que se constroem as edificações. A arquitetura acompanha esta evolução pelos séculos, surgindo da necessidade básica de proteção do ser humano, tanto de predadores como também das intempéries que enfrentaria, caso não estivesse abrigado sobre um lugar mais confortável ao seu convívio. A arquitetura seguiu nos caminhos da história, tendo também como função mostrar-se como uma forma de arte, podem-se destacar as construções clássicas, como as gregas e romanas, bem como as edificações mais modernas.

A arquitetura dita vernacular é aquela que se utiliza dos materiais disponíveis no ambiente. [1] a conceitua como: “uma arquitetura sem arquitetos, empírica, que se dá através da prática, do erro e do acerto. Foi sendo aperfeiçoada com o passar dos tempos e repassada para as gerações futuras, adicionando a ela as tradições culturais preexistentes”. Atualmente, tem-se tido uma notável melhoria nas técnicas construtivas. Entretanto no que diz respeito à arquitetura vernacular é possível ver o pouco conhecimento da população em relação a essas novas tecnologias, uma vez que tanto os padrões culturais quanto ao modo de se construir em certa região limitam as mudanças.

Logo, podemos ver um contraponto entre a arquitetura tradicional e as atuais mudanças instauradas com o uso das novas tecnologias. O modo como se constrói atualmente se caracteriza pelo uso indiscriminado dos recursos, em que, por visar somente o lucro, descartam-se outras soluções. Porém, não se pode negar que existem soluções viáveis e que contemplam os princípios que a sustentabilidade busca.

A tecnologia sustentável busca hoje uma visão de desenvolvimento diferente do que se pode pensar a primeira vista, com um pensamento voltado ao ambientalismo renovado, que segundo [2] defende que o ser humano deve mudar sua forma de ver a degradação do meio ambiente e mudar de atitude, adaptando tudo a forma como já vivem com meios que não afetem tanto o meio ambiente. A mudança de atitude constitui a busca pelas soluções viáveis e adequadas ao planeta.

O conceito de desenvolvimento sustentável foi introduzido pela primeira vez pelo [3], afirmando que este se dá quando se atendem as necessidades atuais, sem comprometer as demandas das futuras gerações. A busca por esse nível de desenvolvimento retratado no conceito pode parecer algo impensável, porém, a propagação do conhecimento a respeito de soluções viáveis para tal propósito já contribui para a mudança desta realidade.

Dentro do campo da sustentabilidade e da arquitetura, uma área de conhecimento ganha força: a arquitetura bioclimática. Segundo [4], essa área pode ser caracterizada por uma relação de harmonia entre a natureza e o ambiente construído. Dessa forma, esse método busca a minimização dos fatores climáticos agressivos, de modo a garantir o máximo de conforto térmico, luminoso e eficiência energética possível. Por meio da correta disposição dos elementos arquitetônicos pode-se alcançar esse conforto, mas vale destacar que é também objetivo desse modo de construir que os custos sejam reduzidos.

A busca por uma arquitetura bioclimática é também uma luta por uma melhor eficiência energética. Levando em conta que atualmente o uso de sistemas de condicionamento ambiental artificial e de iluminação artificial vem sendo amplamente utilizados, o uso

de técnicas arquitetônicas para estabilizar as temperaturas a um nível confortável possibilitaria a redução do uso desses sistemas e conseqüentemente uma redução no consumo energético do consumidor. O aproveitamento da luz solar durante o dia, em detrimento a uma iluminação artificial também traria benefícios nesse sentido, contribuindo também para uma iluminação mais natural e propiciando conforto luminoso. Outro objetivo a ser alcançado é o conforto acústico, de forma que barulhos do ambiente externo não causem desconforto aos usuários no interior do ambiente construído.

Com esse conhecimento é possível mudar padrões da arquitetura vernacular, de forma que possamos ter inúmeros benefícios, tanto a quem reside na edificação, como ao meio ambiente. Esse trabalho busca contribuir para esse fim de forma que apresenta algumas alternativas viáveis para a minimização dos fatores agressivos do clima, diante de um contexto do clima quente e seco do semiárido, no nordeste brasileiro.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Conforto, conforme [5], é conceituado como um estado de conforto pessoal com relação a um ambiente, de modo que não sente nem um tipo de incômodo e tem uma sensação neutra em relação a ele. Dessa forma, o indivíduo não necessita de meios de regulação térmica artificiais. Também é importante ressaltar que esse conceito envolve o conforto acústico, luminoso e o uso racional da energia elétrica.

O meio ambiente, em relação à construção, muitas vezes é visto como elemento antagônico e muitos acreditam que a coexistência entre natureza e edificação é algo inimaginável. Entretanto como já visto, a sustentabilidade busca uma nova visão sobre esses dois fatores. A arquitetura bioclimática busca mudar isso, de modo que filtre os fatores nocivos do ambiente para propiciar o conforto no interior da edificação [4].

Diante da dimensão térmica atribuída ao conforto, podemos constatar a influência do clima para sua promoção. Esse nível de influência, de acordo com [6], pode ser detectado por diversos fatores como, a pressão atmosférica, as precipitações, a umidade do ar e a temperatura, bem como a maritimidade, latitude, altitude, massas de ar, continentalidade e muitos outros.

Um fator importante a ser destacado e que exerce notória influência no clima local são os ventos. É possível mitigar efeitos negativos que o clima possa vir a exercer na construção e nos indivíduos. Mas geralmente, os ventos são muito úteis para a edificação, pois quando há a possibilidade da entrada de ar pelas aberturas a temperatura do ar dentro da edificação será reduzida com relação à exterior.

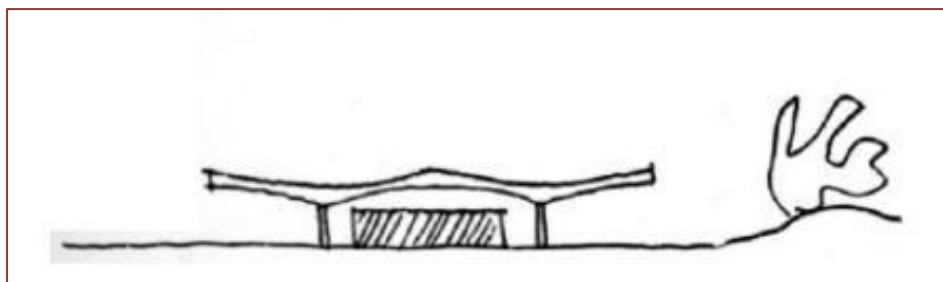
[7] destaca que “A vegetação contribui de forma significativa ao estabelecimento dos microclimas. O próprio processo de fotossíntese auxilia na umidificação do ar através do vapor d’água que libera”. Desse modo pode-se notar que o aproveitamento da vegetação é, portanto, fundamental para o bioclimatismo e é uma das bases para um projeto que contemple esta comodidade almejada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Feitas essas considerações, podemos traçar quais poderão ser as melhores soluções bioclimáticas que proporcionem o conforto tão desejado. Inicialmente, ao projeto arquitetônico que venha a atingir as expectativas do conforto, é importante escolher um local adequado para a construção da edificação, tendo em vista que, em um clima tropical seco deve-se buscar construir casas nas partes mais altas da localidade, pois os movimentos de ar são maiores nesses pontos. Com isso será permitido à edificação aproveitar a brisa que por ali passar, permitindo o alcance dos propósitos bioclimáticos [8].

Segundo [9], outro fator importante para que o sombreamento da edificação é se fazer uso do afastamento das paredes. A criação dessa sombra externa pode resultar num aproveitamento melhor do local para um ambiente de lazer, onde podem ficar terraços, varandas, jardins sombreados ou pérgolas. Para fazer uso desse artifício, devem ser usados beirais mais longos, sejam de telhas ou lajes, pérgolas ou outros elementos. Deve possibilitar que as paredes não fiquem totalmente expostas ao calor do sol. É possível ver um exemplo de um beiral longo na Figura 1.

Figura 1 – Recuo das paredes permitindo filtrar a luz solar



Fonte:[9].

Segundo [5], as características arquitetônicas são transmitidas ao longo do tempo e os alpendres que conhecemos hoje advém de uma necessidade de se ter sombras como lugares de convivência.

Dessa forma, conforme verifica-se na Figura 2, o uso de recuo e alpendres tem como principal função a promoção de uma sombra confortável ao convívio, o que faz da varanda alpendrada um lugar agradável na edificação, adquirindo as funções de uma sala de estar ou até mesmo uma sala de jantar [10].

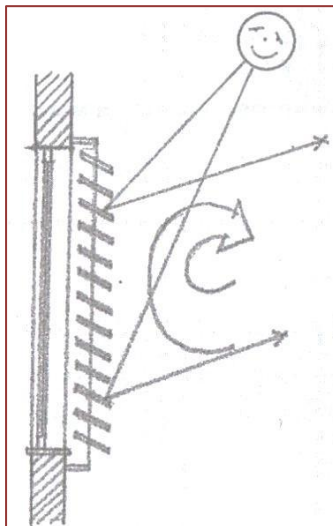
Figura 2 – Casa com beirais afastados aproveitando sombra

Fonte: [10].

Outro fator de extrema importância é a utilização da vegetação, para possibilitar o sombreamento da edificação e também a minimização da severidade do clima dentro da edificação. Desse modo, por meio de árvores, podem-se fazer sombras na medida do possível sobre a residência, diminuindo a temperatura interna do local. Para o bom aproveitamento da vegetação, é importante que ao construir não se pense em desmatar formações vegetais no terreno, mas que na medida do possível seja almejado o aproveitamento de algumas árvores existentes, como destaca [1]. É importante que seja pensado também um jardim, que exercerá uma função estética para a edificação, além de sua utilidade bioclimática, recomendando-se que a vegetação utilizada seja típica daquela região ou adaptada ao clima.

A respeito das aberturas de uma casa, [9] ressalta que as aberturas de exaustão devem ser maiores ou pelo menos iguais às de admissão. Desse modo, para que ocorra a correta circulação da brisa é necessário que as aberturas por onde venham a entrar a aragem tenham tamanhos bons, a fim de que ocorra corretamente uma ventilação cruzada. Um local que possui uma boa abertura voltada para a brisa, mas que não possui outra para que o vento saia, não possibilitará a boa ventilação no local, uma vez que o vento não circulará na residência.

Ainda sobre as aberturas em uma edificação, podemos ressaltar a importância de proteger as fendas dos agentes externos. Conforme [5] os *brise-soleil* (quebra-sol) podem ser usados também para o sombreamento de aberturas, podendo estar incorporados às janelas para que a radiação do sol não entre na edificação diretamente. Além disso, eles também permitem a ventilação para o interior do edifício. Pode-se ver esquematicamente o funcionamento do *brise-soleil* no sombreamento de aberturas na Figura 3.

Figura 3 – Representação esquemática do uso do *brise-soleil* para sombreamento

Fonte: [5].

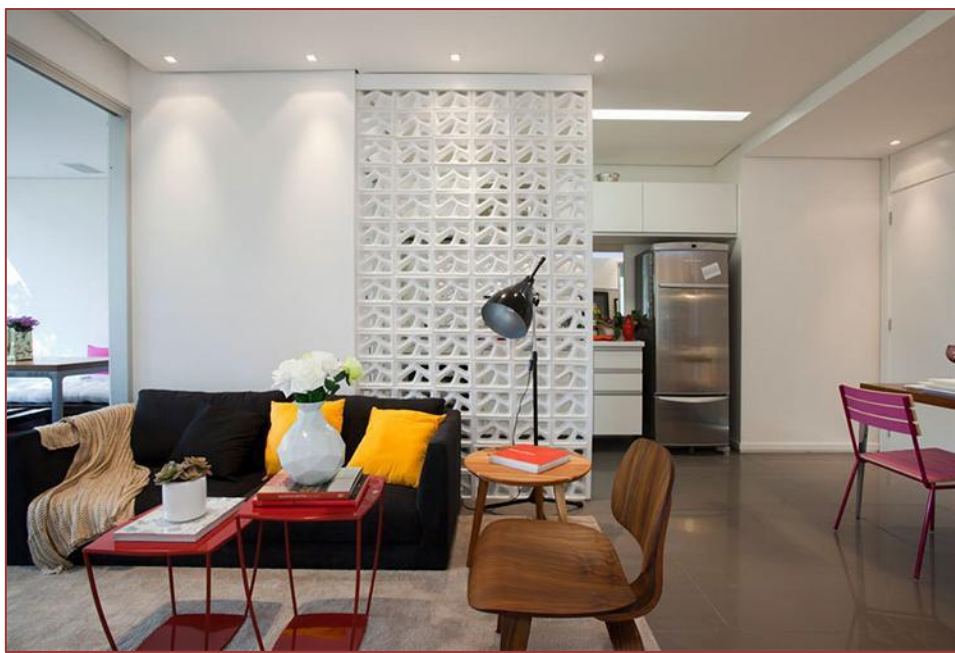
Uma alternativa interessante sugerida por [9] é a utilização de elementos vazados que permitam uma boa circulação de ar. Um elemento que pode ser usado para isso é o cobogó. Tal alternativa torna-se interessante, pois além de sua utilidade e eficiência, esse elemento pode assumir diversas formas, o que tornará a residência mais atrativa do ponto de vista arquitetônico. Na Figura 4, é possível ver as formas como esse elemento pode ser colocado.

Figura 4 – Residência que utiliza muro vazado de cobogó

Fonte: Decorsalteado.

Ainda sobre o cobogó, uma alternativa viável seria seu uso, nas paredes internas, permitindo uma boa circulação de ar no interior da edificação que traria um bom atrativo estético, como demonstrado na Figura 5.

Figura 5 – Cobogó usado como elemento decorativo



Fonte: Hometeka.

Uma proposta sugerida por [9] é dar continuidade aos espaços, ou seja, não compartimentalizar todos os cômodos, permitindo melhor ventilação interna. Porém, é recomendado que atentem por dar privacidade para os cômodos que necessitam deste artifício. Um exemplo disso é a junção entre cozinha, sala de jantar e sala de estar, que na maioria dos casos é separada pela popularmente conhecida divisória da cozinha americana, como demonstrado na Figura 6.

Figura 6 – Cozinha e salas integradas, permitindo ventilação

Fonte: [11]

No que se refere ao conforto acústico, algumas medidas podem ser tomadas visando combater ruídos causadores de desconforto. [5] afirma que para que algumas medidas sejam tomadas, deve-se primeiramente saber se aquele ruído é permitido ou não por lei, caso não seja deve-se procurar meios legais para que ele seja interrompido.

Podem-se usar formas que atuem sobre o percurso do som: colocando a construção o mais longe possível, usando barreiras ou muros ou até mesmo atuando no edifício, posicionando as aberturas para longe do ruído, posicionando cômodos onde há tolerância ao ruído e utilizando materiais que absorvem ruídos [5].

4. METODOLOGIA

Para a realização desse trabalho, foi utilizada a metodologia da pesquisa bibliográfica, que conforme [11], pode ser conceituada como:

A pesquisa bibliográfica é feita a partir do levantamento de referências teóricas já analisadas, e publicadas por meios escritos e eletrônicos, como livros, artigos científicos, páginas de web sites. Qualquer trabalho científico inicia-se com uma pesquisa bibliográfica, que permite ao pesquisador conhecer o que já se estudou sobre o assunto. Existem, porém pesquisas científicas que se baseiam unicamente na pesquisa bibliográfica, procurando referências teóricas publicadas com o objetivo de recolher informações ou conhecimentos prévios sobre o problema a respeito do qual se procura a resposta [11].

Sendo assim essa pesquisa visa principalmente atentar-se ao que já foi realizado por outros pesquisadores anteriormente. De modo que com isso, seja encontrada a resposta ao problema que é apresentado no trabalho.

Logo, por meio desse trabalho os dados para a resolução dos problemas foram obtidos de forma secundária. De modo que não foram extraídos por meio de modos ativos de pesquisa (entrevistas, estudo de caso, pesquisa ação, entre outros). Pois foi feita uma pesquisa bibliográfica dos assuntos que permeavam esse problema e que por meio disto os resultados e soluções ao problema apresentado foram concluídas, respondendo aos questionamentos do projeto.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se, portanto, a importância do trabalho para o conhecimento do bioclimatismo no semiárido nordestino. De modo que as técnicas propostas nesse trabalho podem seguir de modelo na hora de se projetar em determinado local com as características do clima em estudo. O uso dessas soluções que aqui foram mostradas não é algo obrigatório de se utilizar para todos os casos, cabe ao projetista analisar a viabilidade de tais alternativas. Outro fator que pode ser alterado por quem projeta é que as soluções não são padrões fixos para serem traspostos a uma edificação de forma idêntica. Tais sugestões podem ser transformadas pelo projetista, de modo que se possa obter por meio disto um resultado estético mais satisfatório para todos e exerça sua função de forma correta.

É importante também que o projetista atente para a viabilidade da utilização de determinada alternativa. Levando em conta fatores estéticos, mas também financeiros, de modo que o uso de determinada alternativa não torne o projeto oneroso. É importante também levar em conta a facilidade ou não em empregar determinado material presente na alternativa. De modo que a solução seja acessível do ponto de vista financeiro.

O trabalho também contribui para destacar e desmistificar a falsa visão que muitos têm sobre as alternativas sustentáveis. Mostrando que é possível fazer projetos com um enfoque sustentável e visando a eficiência energética, que não necessitem de custos elevados.

Portanto, diante de todas as soluções vistas pode-se concluir que o emprego dessas técnicas nas edificações da região em que se localiza o município de Picuí será de muita valia. Por meio de tudo isso poderá ser proporcionado a quem empregue tais alternativas um conforto a quem residir na edificação, sendo que isso se converterá em um bem-estar térmico, acústico e também luminoso, sem falar nos benefícios que incluem dentre outros uma redução no uso dos sistemas de condicionamento térmico artificial. Cumprindo com isso os preceitos da sustentabilidade e também do bioclimatismo.

REFERÊNCIAS

- [1] **GONÇALVES, C. E. C.** *Ruas confortáveis, ruas com vida*. Brasília: UnB, 2009.
- [2] **FERNANDES, B. L.; SORATI J. F.; MEGDA, M. S.; SILVA, P. T.** *Ambientalismo, Marketing Verde e o Consumidor Pós-Moderno*. Campinas: PUC, 2014.
- [3] **BRUNDTLAND, G. H.** *Our common future: The World Commission on Environment and Development*. Oxford: Oxford University, 1987.
- [4] **OLGYAY, V.** *Design with climate: Bioclimatism approach architectural regionalism*. New Jersey: Princeton University Press, 1963.
- [5] **CORBELLA, O. D.; CORNER, V. N.** *Manual de Arquitetura Bioclimática Tropical*. Rio de Janeiro: Editora Revan, 2011.
- [6] **PENA, R. F. A.** *"O que é clima?"*. Brasil Escola, 2016?. Disponível em

<<http://brasilescola.uol.com.br/o-que-e/geografia/o-que-e-clima.htm>>.

- [7] **ROMERO, M. B.** *Princípios Bioclimáticos para o Desenho Urbano*. 2ª ed. São Paulo: ProEditores, 1988.
- [8] **LEGEN, J. V.** *Manual do Arquiteto Descalço*. São Paulo: Editora Empório do Livro, 2008.
- [9] **HOLANDA, A. de.** *Roteiro para construir no Nordeste: Arquitetura como Lugar Ameno nos Trópicos Ensolarados*. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 1976.
- [10] **GUERRA, F.** *Residência OS/ Jacobsen Arquitetura*. Bragança Paulista, 2017. Disponível em: <<http://www.archdaily.com.br/br/871317/residencia-os-jacobsen-arquitetura>>.
- [11] **DECORSALTEDO.** *Fachadas de casas com cobogó*. 2015. Disponível em: <<http://decorsalteado.com/2015/09/fachadas-de-casas-com-cobogos-veja.html>>. Acesso em 26 de fevereiro de 2018.
- [12] **HOMETEKA.** Divisórias em 3D. Disponível em: <<https://www.hometeka.com.br/pro/divisorias-em-3d-cobogo-madeira-vidro-e-muito-mais/>>. Acesso em: 26 de fevereiro de 2018.
- [13] **DINIZ, B.** *Casa HC/ João Diniz Arquitetura. Brumadinho*, 2017. Disponível em: <<http://www.archdaily.com.br/br/870573/casa-hc-joao-diniz-arquitetura>>. Acesso em 05 de fevereiro de 2018.
- [14] **FONSECA, J. J. S.** *Metodologia da pesquisa científica*. Fortaleza: UEC, 2002.

Capítulo 4

Conexões entre empreendedorismo e física quântica: novos estudos para a formação do engenheiro

Sônia Marise Salles Carvalho

Resumo: Este artigo aborda as possíveis conexões entre os princípios da física quântica e o empreendedorismo na formação do engenheiro no Brasil. A questão de pesquisa é: que conexões podemos estabelecer entre os fundamentos do empreendedorismo e os princípios da física quântica, para tornar a atuação profissional do engenheiro mais adequada à sociedade atual? O objetivo da pesquisa é propor um quadro conectivo capaz de estabelecer as ligações entre as competências estabelecidas pelas Diretrizes Curriculares Nacionais em engenharia, os princípios da física quântica e o comportamento e competência empreendedora. O fenômeno tem sido apresentado na literatura nacional e internacional, por meio de análises disciplinares, seja no campo da administração (gestão), psicologia (estudos comportamentais) ou sociologia (relacionamentos e capital social) e ainda pouco relacionado à educação. As análises interdisciplinares desse fenômeno ainda são recentes, envolvendo o diálogo entre as ciências humanas e as ciências físicas. A principal contribuição teórica é reduzir a lacuna teórica para o tema aqui proposto. Quanto às implicações práticas, destaca-se a utilização dessas conexões para definir os perfis empreendedores, estabelecidos nas Diretrizes Curriculares Nacionais, necessários à atuação do engenheiro brasileiro, na produção de soluções tecnológicas e sociais para promover o desenvolvimento do país.

Palavras-chave: física quântica, empreendedorismo, engenharia.

1. INTRODUÇÃO

A proposta de se tomar emprestado categorias de análise de uma ciência para outra para melhor compreensão de um fenômeno não é novidade na literatura mundial e é a perspectiva dessa pesquisa, pela possibilidade da construção de um arcabouço teórico inovador sobre o fenômeno do empreendedorismo nas engenharias. O que nos motivou a transbordar as análises disciplinares, pedindo licença à ciência física, em especial a física quântica, foram seus construtos filosóficos com a possibilidade de qualificar os estudos do empreendedorismo e torná-lo mais alinhado à formação do engenheiro empreendedor.

A sociedade tecnológica contemporânea está fundamentada na sociedade do conhecimento e tecnologias 5.0 e o futuro profissional engenheiro prescinde de uma formação com capacidades técnicas e humanísticas. O processo pedagógico exige um currículo por competências e os estudos das Diretrizes Curriculares Nacionais ?DCNs para os Cursos de engenharia no Brasil apontam um gap sobre essas duas interfaces.

Nessa perspectiva esse artigo tem a finalidade de mostrar as possíveis interfaces entre os atributos do empreendedorismo e os princípios da física quântica e como essas interfaces contribuem para explorar oportunidades de ação para a implementação das DCNs no currículo das engenharias.

A pergunta de pesquisa é: que conexões podemos estabelecer entre os fundamentos do empreendedorismo e os princípios da física quântica, para tornar a atuação profissional do engenheiro mais adequada à sociedade atual? As reflexões que se desdobram dessa questão impulsiona na proposição de um quadro conectivo demonstrativo dessas conexões.

Esse artigo possui cinco sessões: introdução com a questão básica de pesquisa e objetivos; a segunda sessão revela o referencial teórico que fundamentou a pesquisa; a terceira sessão apresenta a metodologia, a quarta sessão os resultados com a apresentação das conexões que podem ligar o empreendedorismo propostos pelas Diretrizes Curriculares Nacionais nas Engenharias e os princípios da física quântica, a quinta sessão registra as considerações finais com as contribuições teóricas, implicações práticas e os limites da pesquisa.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. OS PRINCÍPIOS DA FÍSICA QUÂNTICA

Os físicos quânticos acreditam que é somente por meio da contradição que as descobertas da física quântica podem ser explicadas. Apontam-se os experimentos realizados pelo físico Shahriar Afshar(2005), David Bohm (2010) e Khrennikov e Haven (2013). Esses autores descrevem , em suas teorias, os três princípios básicos da física quântica: princípio da superposição, da incerteza e da indivisibilidade.

O princípio de superposição que assegura que uma partícula quântica (um átomo ou um elétron) se encontra em todos os estados possíveis de uma vez, os átomos ou elétrons podem estar num local e ao mesmo tempo em todos os lugares do universo. Pode ser representado pelo pensamento de Shahriar e Afshar (2005), pois sugere que somos capazes de mensurar a luz como uma onda e como uma partícula ao mesmo tempo, ou seja, as partículas interagem entre si e a mudança numa delas invariavelmente afeta a outra, sem importar a distância entre elas.

O princípio da indivisibilidade compreende os estudos microscópicos e refere-se aos fenômenos associados aos átomos, moléculas, partículas subatômicas e a quantização de energia. A ideia é que tudo é composto de átomos, dos quais são formados por um núcleo central rodeado de elétrons que giram a seu redor. A física ou mecânica quântica é a teoria científica que serve para explicar como funcionam os elementos minúsculos, tais como os átomos e os elétrons.

O princípio da indivisibilidade foi explorado por Bohm (2010) ao apontar a indivisibilidade como parte da teoria da totalidade, significando que a ação é constituída por quantas indivisíveis e o todo influencia no comportamento dos quantas e estes, influenciam no comportamento do mundo, como um todo. Esse pressuposto está no debate sobre fragmentação e totalidade, pois o mundo é perceptível no nível tridimensional dos objetos, mas o universo é indivisível e os objetos estão interligados, no entanto o pensamento opera de modo fragmentado e capta as coisas em fragmentos.

Para esse autor a ciência física, ao relativizar o olhar sobre o mundo, busca estabelecer a passagem entre o que é o real e a realidade e leva a seguinte questão: o conhecimento que tenho do mundo traduz o que é o mundo ou faz parte de uma interpretação de como penso que é, influenciado por cosmovisões que atravessam o tempo-espço?

A questão identificada por Bohm e Welwood (1980) é que há a fragmentação da consciência humana em relação a natureza geral da realidade e ocorre o impacto nos construtos teóricos das ciências modernas ao desmitificar a crença de que a teoria descreve a realidade tal como ela é na sua essência. Apreende o pensamento como um sistema que participa ativamente na formação das nossas percepções e assegura que nossos processos mentais derivam de nossas percepções e, portanto, não são neutras.

O princípio da incerteza encontra-se na afirmação de que a natureza impõe seus próprios limites sobre o que podemos conhecer, isto é, as situações do “mundo pequeno” podem acontecer em determinada probabilidade. Isto mostra que não há uma certeza absoluta em relação aos movimentos das partículas subatômicas. Quanto mais conhecemos uma partícula quântica menos sabemos sobre sua velocidade, pois duas propriedades de uma mesma partícula não podem ser medidas ao mesmo tempo. Devido a isso, há uma incerteza na previsão dos fenômenos quânticos e por esta causa se fala do princípio da incerteza. A implicação da física quântica é o fato de prever efeitos que vão contra o “senso comum”.

Os estudos de Khrennikov e Haven (2013) reforçam a premissa de que a dualidade onda-partícula da matéria viola a lei básica da probabilidade total. A natureza contraditória da matéria em movimento significa que é impossível para os cientistas quânticos fixar a posição exata de uma partícula a qualquer momento do tempo. Aplicando a lei da probabilidade total não se descreve com precisão a posição das partículas. Tudo o que os físicos podem fazer é dar uma estimativa da probabilidade de onde a partícula estará em algum lugar em um momento dado.

Os três princípios que regem a física quântica – superposição, indivisibilidade e incerteza – podem ser percebidas nas análises das ciências humanas e sociais aplicadas. Por exemplo o livro escrito por Khrennikov e Haven (2013) denominado “Ciência Social Quântica” expressa que a Lei Básica da Probabilidade Total, que calcula a probabilidade de um determinado resultado, é influenciada pela lógica formal e possui a crença de que os seres humanos são racionais e tomam decisões racionais. No entanto, fatores como a superstição, crenças, sentimentos e tradição interferem na tomada de decisão. Isso quer dizer que as interferências, quando aplicado à economia, também explica os valores de

probabilidade aparentemente ilógicos para as tomadas de decisão econômica.

Outro autor importante foi Shelton que apresentou, em 1997, um livro denominado “Gerenciamento Quântico” onde explora as capacidades para se aplicar em uma organização com visão de mundo quântica: ver, pensar, sentir, saber, agir, confiar e ser.

Zohar (1990) também apresenta os pressupostos de uma atitude quântica: 1) Descobrir, no lugar de saber, significa investigar junto com o outro, em vez de bater -se pela sua certeza; 2) Perguntas, não respostas, ou seja, não é ensinar, e sim, explorar possibilidades novas; 3) Partilhar, não ganhar, pois não há um ponto de vista melhor que o outro, há propostas; 4) Igual, não superior, onde todas as posições são válidas, devemos aprender com todos; 5) Reverência, não poder, visto que não há imposição de ideias, há gratidão pela riqueza de cada experiência e 6) Escutar para explorar novas possibilidades.

Os estudos de Zohar (1990) e Shelton (1997) permitiram que as ideias da física quântica pudessem ser aplicadas no desenvolvimento das ciências humanas, em especial, aos estudos organizacionais, pois mostra que o modelo mental de percepção do mundo e da produção do conhecimento sobre esse mundo interfere na forma de gestão da organização.

As capacidades e atitudes dos indivíduos na cena social organizacional, quando estimulados por uma visão de mundo quântico, compreende que a organização é mediada pela incerteza dos impactos e resultados da ação; pela superposição das coisas, onde há interferências de uma ação sobre a outra, sem que se possa calcular exatamente a amplitude e profundidade do efeito e a indivisibilidade, onde cada ambiente da organização reflete e é refletida pela cultura organizacional geral implementada pela organização.

Uma organização que opera com os princípios da física quântica pressupõe uma administração flexível, com liberdade de pensamento para criar e buscar soluções inovadoras, correr riscos calculados e valorizar o trabalho em equipe, com responsabilização pessoal e coletiva e ainda valorizar a condução do processo mais do que o controle dos resultados. Essa perspectiva exige competências empreendedoras de outro tipo.

A física quântica somente pode ser entendida pela contradição e movimento e o processo de desenvolvimento requer uma explicação baseada na mudança e na interconexão. Nesse sentido, a compreensão do mundo requer um processo de mudanças paradoxais e permite um quadro científico mais preciso do que a visão do mundo como estático e mecânico.

Nesse sentido, propomos no quadro 1 estabelecer uma conexão teórica entre os princípios da física quântica, por meio dos estudos de Shahriar Afshar (2005) Bohm (2010) e Khrennikov e Haven (2013); as capacidades quânticas apontadas por Shelton (1997) e a atitude quântica explorada por Zohar (1990).

O quadro 1 busca explorar as possíveis interfaces entre os autores, de modo a obter uma visualização ampla das possibilidades de interlocução entre as categorias de análises que circundam os estudos do fenômeno quântico.

Quadro 1 - Relações entre os princípios da física quântica, a capacidade quântica e atitude quântica

Princípios da física quântica Shahriar Afshar (2005) Bohm(2010) e Khrennikov e Haven (2013)	Caracterização	Capacidades Quânticas Shelton (1997)	Caracterização	Atitude Quântica Zohar (1990)	Caracterização
Superposição	Os fenômenos interagem entre si e a mudança de um invariavelmente afeta o outro	Visão quântica	Ver com intenção	Perguntas, não respostas	Explorar possibilidades novas
		Sentimento quântico	Sentir efetivamente vivo e vibrar com isso	Igual, superior não	Todas as posições são válidas, devemos aprender com todos.
Indivisibilidade	A ação é constituída por quantas indivisíveis e o todo influencia no comportamento dos quantas e estes, influenciam no comportamento do mundo, como um todo	Pensamento quântico	Pensar e analisar com fatos reais	Descobrir, no lugar de saber	Investigar junto com o outro, em vez de bater-se pela sua certeza
		Ação quântica	Agir com responsabilidade	Partilhar, não ganhar	Não há um ponto de vista melhor que o outro, há propostas
		Ser quântico	Ser e fazer-se sentir integral em todos os papéis exercidos na vida	Reverência, não poder	Gratidão pela riqueza de cada experiência
Incerteza	A natureza impõe seus próprios limites sobre o que podemos conhecer, isto é, as situações do “mundo pequeno” podem acontecer em determinada probabilidade	Conhecimento quântico	Desenvolver a intuição e através dela poder direcionar um resultado, uma conquista, uma nova razão para se lutar.	Escutar para explorar nova possibilidade	Explorar possibilidades novas
		Confiança quântica	Confiar na vida, no seu poder de realização, no otimismo e na força de vontade.	Reverência, não poder	Gratidão pela riqueza de cada experiência

Fonte: elaborado pelo autor.

As conexões apresentadas no quadro 1 nos oferecem pistas importantes para tomadas de decisões nas organizações, pois consegue nos revelar o sentido das ações e atitudes das pessoas, que colaboram com a organização. Por exemplo, em uma dada situação de conflito vivida na cena social da organização, ao se utilizar do princípio da indivisibilidade, há que se investigar junto com o outro, as razões de cada um e assim ter condições de analisar e descobrir os fatores que tem causado o mal estar (que pode ser oriundo do indivíduo ou da forma de gestão da organização) e explorar novas possibilidades de concertação, e ir se apropriando da gratidão pela riqueza da experiência vivida e aproveitar a contradição para gerar novos insumos para mudanças. O princípio da superposição pode explicar o sentido da ação dos indivíduos em conflito, quando se entende que a organização está dentro do indivíduo e o indivíduo está dentro da

organização, em uma condição de ser produto e produtor da história dessa organização. A incerteza marca o não controle sobre os resultados, exigindo da organização uma intencionalidade sempre provisória e direcionada para mudanças.

Os desdobramentos das interfaces apresentadas no quadro 1 nos faz refletir sobre as novas competências, habilidades e atitudes que são potencializadas nos indivíduos que trabalham e se movimentam na cena social dentro e fora da organização em um processo contínuo de impactos. .

2.2. OS ESTUDOS DO EMPREENDEDORISMO NAS ENGENHARIAS

O tema do empreendedorismo tem sido estudado na perspectiva disciplinar, tendo como principais interlocutores na administração (Schumpeter, 1985; Drucker, 1996); na psicologia (Lima et al, 2014), sociologia (McClelland, 2014) e no campo da educação (Zampier e Takahashi, 2014); Bakar; Islam; Lee, 2015). Essa abordagem disciplinar fragmenta a compreensão do fenômeno empreendedor, apresentando lacunas nas publicações sobre esse tema nas áreas das engenharias.

Para fundamentar esse artigo utilizou-se a abordagem de autores que analisam o tema em uma perspectiva integrada entre dois ou mais elementos de composição do fenômeno, permitindo análises mais avançadas.

Gibb (2002) associa os atributos empresariais aos objetivos educacionais e reforça que não se deve distanciar os objetivos do sistema de educação e o desenvolvimento de pessoas empreendedoras. Fayolle (2013) sugere que os programas de educação para o empreendedorismo (EEP's) possam efetivamente influenciar as atitudes dos estudantes em relação a intenção de abrir um negócio e há uma relação importante entre a intenção empreendedora e a educação empreendedora.

Dentre os renomados autores, destaca-se Lackéus (2015) que define educação empreendedora sob a perspectiva da criação de valor baseada nas competências para a gestão e execução de processos com mudanças incrementais e a criação de valor exploratório que se identifica baseado nas competências empreendedoras entendidas como conhecimento, habilidade e atitude, na realização do trabalho para criação de novo valor. Também analisa a relação entre empreendedorismo e educação e suas análises têm sedimentado o debate produzido pelo GEM (2020) quando associa empreendedorismo, educação e crescimento econômico.

Outro autor de valiosa contribuição para o tema foi Filion (1993), que propõe um metamodelo empreendedor. A pesquisa ocorreu por meio do estudo com diversos líderes de empresas ao redor do mundo e evidenciou os cinco componentes que devem ser desenvolvidos por profissionais das organizações: *weltanschauung*, visão, liderança, energia e relações.

Para Filion(1993) o empreendedor que possui uma visão é um impulsionador e catalisador de atividades gerenciais, que leva o empreendimento a ir muito além das metas projetadas. O processo de pensar de acordo com uma visão, implica conectar ação e reflexão; fundamentar uma estrutura de referência, habilitar o aprendizado, romper com o olhar fragmentado do mundo e realizar a apreensão da realidade e sua interface com o real. Diz o autor que um pensador com visão implica ser alguém capaz de atingir o equilíbrio entre o fazer e o sonhar e reforça que a visão é um elemento impulsionador que incorpora elementos que se auto influenciam.

Quadro 2- conexão entre comportamento e competências empreendedoras

Aspectos	Comportamento Empreendedor Filion (1993)	Competências Empreendedoras Lakéus (2015)
Conhecimento	Weltanschauungen	Modelos mentais
	Relação	Autopercepção
	Visão	Conhecimento declaratório
Competências	Visão	Marketing
	Relação	Recursos
	Energia	Oportunidades
	Relações	Interpessoais
	Energia	Aprendizado
	Visão	Estratégia
Atitudes	Energia	Paixão Empreendedora
	Energia	Auto eficácia
	Liderança	Identidade, tolerância e incerteza e ambiguidade
	Visão	Inovação
	Energia	Perseverança

Fonte: elaborado pelo autor.

Conforme mostra o quadro 2, os cinco componentes do comportamento empreendedor destacam a visão como transversal aos componentes energia, relações e liderança. Para o autor o processo de pensar por meio da visão fornece ao empreendedor a oportunidade de ser líder, que cria uma cultura para o agir em prol de uma meta e motiva para uma ação empreendedora, que leva à proatividade e a busca de novos referenciais do pensamento.

Filion (1993) faz parte de um dos autores que tem realizado estudos sobre a educação empreendedora priorizando o indivíduo, com medidas voltadas a atitudes e competências empreendedoras não cognitivas e circunscrita as categorias de análise das ciências humanas ou das ciências sociais aplicadas. Nessa perspectiva, as habilidades propostas pro esse autor) em seu metamodelo empresarial, parte da visão que o profissional desenvolve-se a partir do conjunto de relações que estabelece em sua vida e no mundo do trabalho, associado a liderança estimulada pela organização que o impulsiona a empreender.

Para os autores Filion (1993) e Lakéus (2015) o empreendedorismo tem como fundamento atividades de apoio à criação de conhecimento, gerando comportamento, atitudes, intenções e valores essenciais para o indivíduo viver, trabalhar e criar benefícios compartilhados com a sociedade. Esses autores tem em comum o incentivo ao pensamento crítico, ao exercício da liderança e estímulos à inovação e principalmente a empreender para estabelecer a autoconfiança, o espírito de equipe e a empatia, como fundamentos para gerir a vida e o trabalho em bases morais positivas.

O pensamento trazido pelos autores sobre empreendedorismo tem contribuído com as Diretrizes Curriculares Nacionais nas Engenharias, traduzida pela Resolução CNE/CES nº 02/2019, que exigem novos perfis profissionais dos estudantes e mudanças nos papéis do professor, diante do processo de ensino e aprendizagem, mediada por metodologias

ativas. .Nesse processo os estudantes tornam-se protagonistas, o professor passa a ser motivador, orientador e mentor e o conteúdo promove uma qualificação profissional, para que o engenheiro, com as competências empreendedoras adquiridas, possa oferecer benéficos à sociedade, diante da capacidade de inovar e desenvolver soluções tecnológicas.

As DCNs nas Engenharias ao estabelecer o conjunto de competências desejáveis ao engenheiro contribui para o alinhamento da formação profissional e as necessidades da sociedade em seu novo paradigma tecnológico.

2.3. NECESSIDADE DA APROXIMAÇÃO ENTRE OS PRINCÍPIOS DA FÍSICA QUÂNTICA E OS FUNDAMENTOS DO EMPREENDEDORISMO NAS ENGENHARIAS

O construto teórico-metodológico da ciência moderna, marcada pelo paradigma positivista, com característica disciplinar e especialista, tem se mostrado insuficiente para promover ações que favoreçam mudanças capazes de qualificar a formação empreendedora do engenheiro. Nesse sentido, buscou-se aprimorar os estudos sobre empreendedorismo por meio do diálogo entre as ciências humanas e as ciências físicas.

Os estudos do empreendedorismo na visão quântica mostrou que ao estudar o comportamento empreendedor somente é possível apreender sua essência a partir da indivisão de suas características intrínsecas, ou seja, as relações estabelecidas com os estudos da mente e a compreensão de como as pessoas aprendem no campo da psicologia cognitiva. No entanto, a literatura tem apresentado sob um olhar fragmentado, traduzido de categorias analíticas que abrange aspectos limitados do fenômeno, seja como teoria que não se manifesta em ação ou como ação que não expressa a realidade. Portanto não se faz observar a relação entre cognição e comportamento empreendedor, sendo essa uma das críticas

A pesquisa bibliométrica sobre Totalidade e ordem implicada, realizada pelo professor Elzo Aranha, da Universidade Federal de Itajubá, em 2013, identificou que a combinação dos temas empreendedorismo e física quântica, mais especificamente, a teoria da totalidade, não foi explorada pelos pesquisadores da área e a combinação desses dois termos, com a perspectiva cognitiva e comportamental do empreendedor, ainda não foi adequadamente interconectada.

As reflexões de Bohm (1980) podem ser observadas também na pesquisa de Filion (1993) quando apontou a indissociabilidade e a indivisibilidade entre os cinco componentes no comportamento empreendedor (cosmovisão, visão, relações, energia e liderança). O indivíduo ao captar, por meio da sua percepção, informações e conhecimentos, o faz baseado em uma ordem implicada e dobrada, isto é enxerga o que vê na superfície e à medida em que vai imergindo para compreensão mais profunda vai desdobrando as informações, gerando novos conhecimentos sobre o fenômeno investigado, identificando . as interferências da cosmovisão e visão sobre a compreensão dos componentes sociais, políticos e culturais que contornam esse fenômeno.

A implicação é que a cosmovisão e a visão ao interferir nos outros componentes pode caracterizar o comportamento empreendedor, cuja percepção da relevância do que há no mundo real e o que o empreendedor pensa que há ali, constituem inferências que podem determinar o futuro da organização. O pensamento do empreendedor revela uma mente que processa símbolos e significados, na relação com o mundo externo. O processo de julgamento, raciocínio, afirmações e interpretações da realidade faz parte do

modelo mental e interfere nas ações.

Portanto, o metamodelo do comportamento empreendedor apresentado por Filion (1993) foi um *insight* importante que reforçou a visão de totalidade ao conectar os cinco componentes e mostrar as implicações das motivações da tomada de decisões do empreendedor, fundamentada pela forma de olhar, compreender e transformar o mundo.

Na perspectiva da indivisibilidade, o empreendedor é considerado aquele que consegue apreender conhecimentos e estabelecer conexões entre diferentes variáveis que não estão visivelmente apresentadas e que servirão de suporte para a formulação e implementação da visão sobre o produto ou negócio projetado. Diz respeito ao aprendizado que o empreendedor individual experimenta ao interagir com o ambiente quanto à mudança e criação de valor que ele causa por meio de suas ações. A aprendizagem e a criação de valor são, assim, vistas como dois aspectos principais do empreendedorismo e permiti que os alunos tentem criar valor para as partes interessadas externas e resultará no desenvolvimento de competências empreendedoras.

A proposta de inserir o empreendedorismo no currículo das engenharias requer mudanças na prática pedagógica do professor e isso significa mudar o modelo mental de como se ensina e de como os estudantes aprendem. Da mesma forma se aplica ao estudante na medida em que a aprendizagem resgata o conjunto de conhecimentos e habilidades e que devem estar dispostos a praticar. Ou seja, falamos aqui da necessidade de reestruturar a formação nos cursos de engenharia do Brasil, orientados por meio de uma visão “quântica” de mundo, isto é, ver o universo como um sistema dinâmico, imprevisível, subjetivo e auto-organizador e não como uma máquina previsível e objetiva (Inácio, 2008).

Ao aproximar os princípios da física quântica e os fundamentos do empreendedorismo proposto pelas DCNs nas engenharias, nos possibilita desvelar que as competências exigidas por um engenheiro na sociedade moderna requer dele competências empreendedoras, ou seja, saber transformar oportunidades em oportunidades empreendedoras, buscando soluções baseadas em novas conexões entre conhecimentos oriundos das ciências, realizando transbordamentos e atravessamentos entre elas, de modo a tornar inteligível uma ação que desdobrada, gera solução exequível ao problema investigado.

No entanto, a abordagem do empreendedorismo e educação como campos desconectados e sem influências, ainda ocorre em muitas instituições de ensino superior brasileiro, porque a cosmovisão do pensamento ocidental é olhar o mundo sob a perspectiva da fragmentação e não da totalidade. Essa perspectiva mantém os currículos disciplinares e a teoria e prática separados, prejudicando a formação sistêmica do estudante de engenharia, que precisa agir sobre um mundo integrado, em conflito e em movimento.

Quadro 3- Conexão entre as DCN's nas Engenharias e capacidade e atitude quântica

Desenvolvimento de Competências desejáveis ao Engenheiro (DCN's, 2019)	Capacidade e Atitude Quântica
Ser capaz de reconhecer as necessidades dos usuários, formular, analisar e resolver, de forma criativa os problemas de Engenharia.	Sentimento e conhecimento quântico (flexibilidade, escutar e explorar novas oportunidades)
Conceber, projetar e analisar sistemas, produtos (bens e serviços), componentes ou processos.	Pensamento e conhecimento quântico (descobrir e explorar novas oportunidades),
Conhecer e aplicar com ética a legislação e os atos normativos no âmbito do exercício da profissão.	Ação quântica – agir com responsabilidades
Formular e conceber soluções desejáveis de Engenharia, analisando e compreendendo a necessidade dos usuários e seu contexto.	Conhecimento quântico – desenvolver a intuição
Analisar e compreender os fenômenos físicos e químicos por meio de modelos simbólicos, físicos e validados por experimentação	Pensamento quântico – pensar e analisar com fatos reais.
Ter visão holística e humanista, ser crítico, reflexivo, criativo, cooperativo e ético e com forte formação técnica.	Visão quântica – ver com intenção Ser crítico – reverência
Adotar perspectivas multidisciplinares e transdisciplinares em sua prática.	Visão quântica – ver com intenção
Implantar, supervisionar e controlar as soluções de Engenharia.	Conhecimento quântico
Estar apto a pesquisar, desenvolver, adaptar e utilizar novas tecnologias, com atuação inovadora e empreendedora.	Confiança quântica- otimismo e força-de-vontade
Aprender de forma autônoma e lidar com situações e contextos complexos, atualizando-se em relação aos avanços da ciência, da tecnologia e aos desafios da inovação.	Pensamento quântico e visão quântica

Fonte: elaborado pelo autor.

É preciso ter capacidade e atitude quântica para empreender, dado que toda ação empreendedora requer disposição para mudança, flexibilidade, intencionalidade e perseverança. Porém a diferença está no modelo mental de como penso, sinto e ajo sobre o mundo.

Esse pensamento, sentimento e ação estão imbuídos de incerteza, imprevisibilidade, riscos e intencionalidades, capazes de oferecer inputs para lidar com um sistema dinâmico onde as variáveis não são controladas e o sentido das ações nem sempre obedece ao curso para qual foram projetadas.

Portanto, a compreensão do empreendedorismo, na perspectiva da ideia da física quântica e nessa pesquisa, prescinde do estabelecimento de relações entre a mente, a estrutura do pensamento, o comportamento, as atitudes e as finalidades da aprendizagem. As atitudes e as capacidades quânticas, observados no quadro 3, podem ser parâmetros importantes para o desenvolvimentos das competências empreendedoras na formação dos engenheiros.

3. METODOLOGIA

A pesquisa é de natureza qualitativa, pois é voltada para a compreensão do comportamento, em uma perspectiva mais subjetiva dos dados (Martins; Theóphilo, 2009), que permite o entendimento do objeto da pesquisa em sua totalidade, ao destacar o contexto e as interações do sujeito, em seu cotidiano no ambiente de aprendizagem (Flick, 2009) e em ambientes de inovação.

Gil (2002, p.94) corrobora, dizendo que “[...] métodos de pesquisa qualitativa estão voltados para auxiliar os pesquisadores a compreenderem pessoas e seus contextos sociais, culturais e institucionais” e Godoy (1995, p.58) afirma: “[...] é a obtenção de dados descritivos sobre pessoas, lugares e processos interativos pelo contato direto do pesquisador com a situação estudada, para compreender os fenômenos segundo a perspectiva dos sujeitos, ou seja, dos participantes da situação em estudo”.

Os estudos e reflexões dessa pesquisa são de natureza exploratória, pois ainda é pouco conhecido e analisado as conexões entre princípios da física quântica e os fundamentos do empreendedorismo. Partiu-se da identificação da lacuna existente na literatura sobre conexões entre esses dois termos e como o intercâmbio entre as ciências amplia o esclarecimento sobre um determinado fenômeno. A partir dessa constatação, foi estabelecida a formulação do problema que orientou o desenvolvimento da pesquisa (Lakatos, Marconi, 2003).

Outra característica da pesquisa é sua metodologia reflexiva e segundo Alvesson e Sköldbberg (2009) essa metodologia configura uma reflexão baseada em desdobramentos dessa reflexão, envolvendo a conexão entre a física quântica e as ciências humanas e sociais aplicadas.

4. RESULTADO

A compreensão do empreendedorismo é ampliada quando se estabelece conexões com os princípios da física quântica (indivisibilidade, justaposição e incerteza) ao desenvolvimento do conhecimento, habilidades e atitudes empreendedoras, conforme registrado no quadro 4.

Quadro 4: conexões entre os princípios da física quântica, os fundamentos do empreendedorismo e as DCNs nas engenharias

Princípios da física quântica Shahriar Afshar (2005) Bohm(2010) e Khrennikov e Haven (2013)			
	Capacidades Quânticas Shelton (1997)	Atitude Quântica Zohar (1990)	DCNs nas Engenharias
Superposição	Visão quântica	Perguntas, não respostas	Ser capaz de reconhecer as necessidades dos usuários, formular, analisar e resolver, de forma criativa os problemas de Engenharia. Adotar perspectivas multidisciplinares e transdisciplinares em sua prática
	Sentimento quântico	Igual, não superior	Formular e conceber soluções desejáveis de Engenharia, analisando e compreendendo a necessidade dos usuários e seu contexto.
Indivisibilidade	Pensamento quântico	Descobrir, no lugar de saber	Ter visão holística e humanista, ser crítico, reflexivo, criativo, cooperativo e ético e com forte formação técnica
	Ação quântica	Partilhar, não ganhar	Analisar e compreender os fenômenos físicos e químicos por meio de modelos simbólicos, físicos e validados por
	Ser quântico	Reverência, não poder	Aprender de forma autônoma e lidar com situações e contextos complexos, atualizando-se em relação aos avanços da ciência, da tecnologia e aos desafios da inovação.
Incerteza	Conhecimento quântico	Escutar para explorar nova possibilidade	Conceber, projetar e analisar sistemas, produtos (bens e serviços), componentes ou processos Implantar, supervisionar e controlar as soluções de Engenharia
	Confiança quântica	Reverência, não poder	Estar apto a pesquisar, desenvolver, adaptar e utilizar novas tecnologias, com atuação inovadora e empreendedora. Conhecer e aplicar com ética a legislação e os atos normativos no âmbito do exercício da profissão

Fonte: elaborado pelo autor.

A perspectiva das conexões registradas no quadro 4 pode ser explorada na realização de outras novas conexões e servem de eixo analítico básica para novos estudos. Por exemplo, compreender que uma competência necessária para inovar exige do empreendedor uma visão futura do empreendimento, que possa gerar novo valor à sociedade, antecipando as necessidades de soluções. Essa condição tem sido revelada por pessoas que exploram sua criatividade e por isso possuem otimismo e confiança na ação e aprendem com os erros e acertos. A taxa de sucesso de uma solução está associado a amplitude das conexões que o empreendedor consegue enxergar e é caracterizada pela sua percepção de mundo, como um todo indivisível.

O quadro 4 mostra que os componentes determinam e são determinados uns pelos outros e que se auto influenciam, produzindo as condições objetivas de mudanças nas crenças e valores sobre o mundo, materializados no comportamento empreendedor .

5. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A perspectiva de se tomar emprestado categorias de análise de uma ciência para outra para melhor compreensão de um fenômeno social é pouco usual na comunidade científica, pois a produção de conhecimento ainda tem sido pautado por uma ciência positiva e cartesiana, cuja crença sobre a produção de conhecimento ocorre de forma linear, disciplinar e previsível. A produção do conhecimento sobre o fenômeno do empreendedorismo não escapou dessa tradição.

Portanto o esforço dessa pesquisa em ampliar a compreensão desse tema, buscando emprestado os princípios da ciência física quântica, nos revelou cinco percepções:

1. a ação empreendedora somente acontece quando os gestores e professores dos cursos de engenharia passam a compreender os limites da linguagem, do pensamento e da percepção da realidade proposta pela ciência positiva;
2. a visão quântica contribui para uma aprendizagem ativa, reflexiva e crítica, orientada para a resolução de problemas concretos e projetos colaborativos;
3. as influências da vida real, marcadas pelas experiências reais, embasam a lei básica de probabilidade do resultado de uma ação, pois não há como controlar os resultados da ação humana. Esse pressuposto quântico da incerteza se aplica a economia e a vida social e precisa ser incorporado nos projetos inovadores criados pelos engenheiros;
4. a oportunidade de experimentação, colaboração e empatia na vida comunitária acadêmica muda o *weltanschauung* e a visão dos professores e estudantes dos cursos de engenharia, possibilitando ação empreendedora e
5. a combinação criativa entre experiência (ação), conhecimento (cognição) e sentimento (emoção), proposto pela capacidade quântica, estudada por Shelton (1997), pode fundamentar a implementação das Diretrizes Curriculares Nacionais dos cursos de engenharia.

A perspectiva dessa pesquisa foi a aplicação da lógica da teoria quântica aos sistemas sociais que pode elevar nosso entendimento da sociedade humana a um nível totalmente novo e que as questões de contradição e mudança são as características definidoras tanto da física quântica quanto da economia, da história e da consciência humana. Esses devem ser os atributos reveladores da ação empreendedora dos engenheiros no século XXI.

Os limites dessa pesquisa foi que a percepção das conexões entre os temas ainda está no campo da ideiação e é preciso desdobrar a análise desse artigo para os estudos da cultura organizacional educacional.

REFERÊNCIAS

- [1] AFSHAR Shahriar. **Violation of the principle of complementarity, and its implications**». Proceedings of SPIE. 5866: 229-244, 2005.
- [2] ALVESSON, M; SKOLDBERG, K. **Reflexive methodology**: New vistas for qualitative research. London, UK: Sage, 2009.
- [3] BAKAR, R.; ISLAM, M. A.; LEE, J. **Entrepreneurship Education**: experiences in selected countries. International Education Studies, v. 8, n. 1, p. 88-99, 2015.
- [4] BOHM, D; WELWOOD, J. **Issues in physics, psychology and metaphysics**: A conversation. **The Journal of Transpersonal Psychology**, v. 12, n. 1, p. 25, 1980.

- [5] BOHM, D. **Sobre o problema da verdade e da compreensão em ciência**. Khronos, 2010.
- [6] DIRETRIZES CURRICULARES NACIONAIS DOS CURSOS DE ENGENHARIA. Ministério da Educação, PARECER CNE/CES 1.362/2001. Brasília, 2019. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/cne/arquivos/pdf/CES1362.pdf>. Acesso em: 28 dez. 2019
- [7] DRUCKER, P. F. **Inovação e espírito empreendedor**: prática e princípios. 6. ed. São Paulo: Pioneira, 1996.
- [8] FAYOLLE, A. **Personal views on the future of entrepreneurship education**. Entrepreneurship and Regional Development, v.25, n.7-8, p. 692-701, 2013.
- [9] FILION, L. **Visão e relações**: elementos para um metamodelo empreendedor. Revista de Administração de Empresas, v. 33, p. 50-61, 1993.
- [10] FLICK, U. **Qualidade na pesquisa qualitativa**. In: Qualidade na pesquisa qualitativa. p. 196-196, 2009.
- [11] GIBB, A. In pursuit of a new 'enterprise' and 'entrepreneurship' paradigm for learning: Creative destruction, new values, new ways of doing things and new combinations of knowledge. International Journal of Management Reviews, 4(3), 233-269. 2002. <https://doi.org/10.1111/1468-2370.00086>.
- [12] GIL, C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4ª ed. São Paulo: Atlas, 2002. 176 p
- [13] GODOY, A. **Introdução à pesquisa qualitativa e suas possibilidades**. Revista de administração de empresas, v. 35, p. 57-63, 1995.
- [14] INÁCIO, S. **Gestão quântica**. Netsaber artigos. Disponível em: <https://artigos.netsaber.com.br/list_artigos_por_autor.php?autor=Sandra%20Regina%20da%20Luz%20In%20E1cio>. Acesso em 23 de março de 2022.
- [15] HAVEN, E. KHERENNIKOV, A. **QUANTUM SOCIAL SCIENCE**, 2013. DOI DOI:10.1017/CBO9781139003261. Corpus ID: 118935560
- [16] LACKÉUS, Martin. **Entrepreneurship in Educacion**. OECD. LEED, 2015.
- [17] LIMA, E. et al. **Educação superior em empreendedorismo e intenções empreendedoras dos estudantes**: relatório do estudo. São Paulo: Grupo APOE. 2014
- [18] MARCONI, M; LAKATOS, E. **Fundamentos de metodologia científica**. Atlas. 2003.
- [19] MARTINS, G.; THEÓPHILO, C. **Metodologia da investigação científica**. São Paulo: Atlas, p. 143-164, 2009.
- [20] MCCLELLAND, D. C. **Characteristics of successful entrepreneurs**. The Journal or Creative Behavior, v. 21, n. 3. p. 219-233, 1987.
- [21] SHELTON, C. **Gerenciamento quântico**. Editora Cultrix, 1997.
- [22] SCHUMPETER, J. A. **A Teoria do Desenvolvimento Econômico**: uma investigação sobre lucros, capital, crédito, juro e o ciclo econômico. Tradução de Maria Sílvia Possas. Rio de Janeiro: Nova Cultural, 1985.
- [23] ZAMPIER, M. A.; TAKAHASHI, A. R. W. **Competências e aprendizagem empreendedora em MPE's educacionais**. Revista Pensamento Contemporâneo em Administração. v. 8, n. 3, p. 1-22, 2014.
- [24] ZOHAR, D. **O ser quântico**. Uma visão revolucionária da natureza humana e da consciência, baseada na nova física. 14. ed. São Paulo: Editora Best Seller. 305 p. Tradução do original: The quantum self, 1990.

Capítulo 5

Utilização da Análise de Variância para comparar três métodos diferentes de ensino em uma escola particular

*Julia Graziella Costa Vidal
Thamires Nascimento Strojnowski
Naomy Euphemio de Souza
Rhaíssa Maria Lemos
Geovane Alves de Andrade
Marina Rennó Silva Fróes
Lucas Lamin de Souza Silva
Julio Cesar Oliveira Antunes
Diógenes da Silva Oliveira
Diego Sebastian Carvalho de Souza
Hugo Pimentel Tavares
Carlos Eduardo da Silva
Luiz Guilherme de Andrde Aguiar
Nilo Antonio de Souza Sampaio*

Resumo: Este estudo teve como objetivo utilizar ANOVA e teste de Tukey em cinco amostras de dados de uma escola de ensino médio da Região Sul do Estado do Rio de Janeiro. Vale ressaltar que os dados são inteiramente empíricos, obtidos por amostragem *in loco*.

Palavras-chave: *Software estatístico, ANOVA, teste de Tukey.*

1. INTRODUÇÃO

A Estatística tem papel fundamental na análise e interpretação de dados ambientais, sendo uma ferramenta essencial para a compreensão de fenômenos ecológicos, monitoramento de recursos naturais, avaliação de impactos ambientais e definição de políticas públicas sustentáveis. Por meio de métodos estatísticos, é possível coletar, organizar e interpretar grandes volumes de dados provenientes de diferentes fontes, como sensores remotos, estações meteorológicas e estudos de campo. Na área ambiental, a Estatística é amplamente utilizada no monitoramento da qualidade do ar e da água, análise de séries temporais climáticas, modelagem da dispersão de poluentes, estudos de biodiversidade, entre outras aplicações. A análise estatística permite, por exemplo, identificar tendências de aquecimento global, prever eventos extremos como enchentes e secas, e avaliar os efeitos de atividades humanas sobre o meio ambiente (Machado, G. A.; Lima, 2011).

O "Teste de Fisher ANOVA" é uma referência confusa, pois a ANOVA (Análise de Variância) é um método que utiliza um teste F para comparar médias entre múltiplos grupos, enquanto o Teste Exato de Fisher é um teste não paramétrico para variáveis categóricas, usado com dados de baixa frequência em tabelas de contingência. O Teste F da ANOVA é uma estatística que compara a variância entre grupos com a variância dentro dos grupos, enquanto o Teste Exato de Fisher calcula a probabilidade exata de todas as combinações possíveis de tabelas de contingência (Paese et al., 2001).

O objetivo deste artigo é mostrar a aplicação do realização de Análise de Variância para as cinco amostras, e na sequência o Teste de Tukey em seguida, serão apresentados os resultados e as discussões dos objetivos propostos. Por fim, será apresentada as Conclusões.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A Análise de Variância (ANOVA) é um teste estatístico que compara simultaneamente as médias de três ou mais grupos para determinar se há diferenças significativas entre elas, avaliando se essas diferenças são reais ou apenas resultantes do acaso. Ela é útil em diversas áreas, como medicina e marketing, e serve para verificar a influência de variáveis independentes em uma variável dependente. A validade da ANOVA depende do cumprimento de seus pressupostos, como a independência das observações e a homogeneidade das variâncias, e é crucial não realizar múltiplos testes t em vez de uma ANOVA, o que pode aumentar o risco de erros (André Vilela Komatsu, 2017).

A ANOVA divide a variância total observada nos dados em diferentes fontes de variação (por exemplo, entre os grupos e dentro dos grupos). Se a variação entre os grupos for significativamente maior do que a variação dentro deles, o teste F (calculado na ANOVA) indicará uma diferença significativa (Stoker et al., 2020).

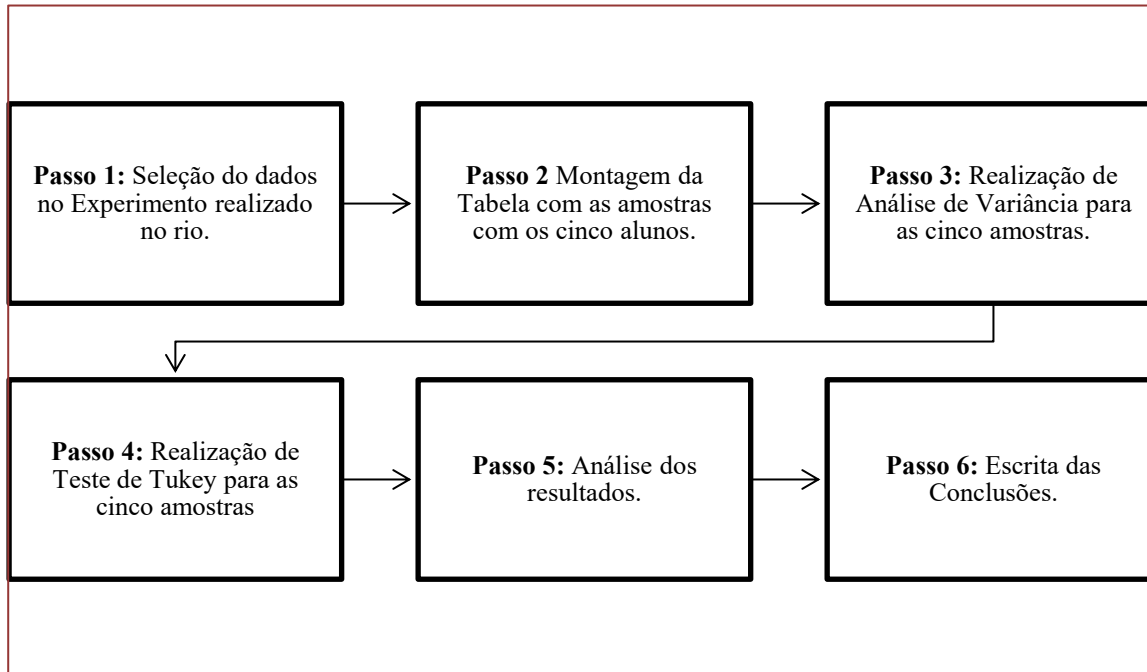
O Teste de Tukey (ou Teste HSD - Honest Significant Difference) é um teste estatístico de comparação múltipla que se aplica após uma análise de variância (ANOVA) indicar diferenças significativas entre grupos. Ele compara as médias de cada par de tratamentos ou grupos para identificar quais são estatisticamente diferentes, sendo útil para determinar qual tratamento é o "melhor" em um experimento. Para sua aplicação, é necessário calcular a Diferença Mínima Significativa (DMS), usando um valor tabelado (Q), o quadrado médio do resíduo da ANOVA e o número de tratamentos e graus de liberdade do erro (Nascimento et al., 1993).

3. MÉTODO DE PESQUISA

Este artigo pode ser classificado como uma pesquisa aplicada, pois visa a fornecer melhorias na literatura atual, com objetivos empíricos normativos, visando ao desenvolvimento de políticas e estratégias que melhorarão a condição atual. (Rezende et al., 2023; Sampaio et al., 2022). A abordagem do problema é quantitativa, como o método de pesquisa de modelagem e simulação. As etapas da pesquisa foram realizadas de acordo com a sequência mostrada na Figura 1.

- Etapa 1: Os dados experimentais foram selecionados de um experimento realizado no Rio Paraíba do Sul em dois pontos específicos.
- Etapa 2: Montagem da Tabela com as amostras obtidas no ponto 1 e ponto 2 do rio.
- Etapa 3 Realização de Análise de Variância para as cinco amostras usando o software Minitab 19.
- Etapa 4: Realização de Teste de Tukey para as cinco amostras.
- Etapa 5: a situação do problema foi analisada e as possíveis tomadas de decisão foram baseadas nos resultados obtidos.
- Etapa 6: As conclusões apresentadas no final deste artigo foram tiradas com base nos resultados obtidos nas etapas anteriores.

Figura 1. Passos do método de pesquisa



Fonte: Autores (2025).

3.1. ESTUDO DE CASO

Em uma escola no Sul do Estado do Rio de Janeiro está se testando três métodos diferentes de ensino para melhorar o desempenho dos alunos em matemática:

- Método A: Ensino tradicional;
- Método B: Ensino com uso de tecnologia (vídeo-aulas, apps);
- Método C: Aprendizagem baseada em projetos (ABP).

Após 1 semestre, 5 alunos considerados melhores nas avaliações da escola de cada grupo foram submetidos à mesma prova de matemática, com pontuação de 0 a 100. Verificar se há diferença significativa no desempenho médio dos alunos entre os três métodos de ensino (5% de significância).

Tabela 1. Amostra de 5 alunos com as notas pelo método A,B e C

Aluno	Método A	Método B	Método C
1	70	80	90
2	65	85	95
3	60	75	85
4	72	78	88
5	68	82	92

Fonte: Autores (2025).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. ESTUDO DE CASO

Realizou-se inicialmente a Análise de Variância com as amostras e criou-se 2 amostras:

- H_0 (nula): As médias dos três grupos são iguais.
- H_1 (alternativa): Pelo menos uma média é diferente (Scholz & Stephens, 2012).

CÁLCULOS DA ANOVA

Temos:

- $k = 3$ grupos
- $n = 15$ observações no total (5 por grupo)

a. Médias dos grupos

- Média A: $(70 + 65 + 60 + 72 + 68) / 5 = 67$
- Média B: $(80 + 85 + 75 + 78 + 82) / 5 = 80$
- Média C: $(90 + 95 + 85 + 88 + 92) / 5 = 90$

3. Soma dos Quadrados

a. SQ Entre Grupos (SQG)

$$\begin{aligned} SQG &= n_g \cdot \sum (\bar{X}_i - GM)^2 \\ &= 5 \cdot [(67 - 78.67)^2 + (80 - 78.67)^2 + (90 - 78.67)^2] \\ &= 5 \cdot [136.11 + 1.78 + 129.44] = 5 \cdot 267.33 = 1336.67 \end{aligned}$$

b. Média geral (GM)

$$GM = \frac{\sum \text{todas as notas}}{15} = \frac{70 + 65 + \dots + 92}{15} = \frac{1180}{15} \approx 78.67$$

b. SQ Dentro dos Grupos (SQR)

Somar os quadrados das diferenças entre cada valor e sua média de grupo.

- Para A:

$$(70 - 67)^2 + (65 - 67)^2 + (60 - 67)^2 + (72 - 67)^2 + (68 - 67)^2 = 9 + 4 + 49 + 25 + 1 = 88$$

- Para B:

$$(80 - 80)^2 + (85 - 80)^2 + (75 - 80)^2 + (78 - 80)^2 + (82 - 80)^2 = 0 + 25 + 25 + 4 + 4 = 58$$

- Para C:

$$(90 - 90)^2 + (95 - 90)^2 + (85 - 90)^2 + (88 - 90)^2 + (92 - 90)^2 = 0 + 25 + 25 + 4 + 4 = 58$$

$$SQR = 88 + 58 + 58 = 204$$

4. Graus de Liberdade

- gl entre (SQG): $k - 1 = 3 - 1 = 2$
- gl dentro (SQR): $n - k = 15 - 3 = 12$
- gl total: 14

5. Quadrados Médios

$$QM_{entre} = SQG/2 = 1336.67/2 = 668.33$$

$$QM_{dentro} = SQR/12 = 204/12 = 17$$

6. Estatística F

$$F = \frac{QM_{entre}}{QM_{dentro}} = \frac{668.33}{17} \approx 39.31$$

7. Valor crítico / p-valor

Vamos comparar com o valor crítico da F (com gl1 = 2, gl2 = 12) para $\alpha = 0.05$. O valor crítico de F ≈ 3.89 .

Como $F = 39.31 > 3.89$, rejeitamos H_0 .

Portanto existe evidência estatística para afirmar que há diferença entre pelo menos dois métodos de ensino. Ou seja, o método de ensino afeta o desempenho dos alunos. Realizou-se portanto o Teste de Tukey para realizar as comparações múltiplas dos métodos.

Tabela 2. Teste de Tukey com as notas pelo método A,B e C

Grupo 1	Grupo 2	Dif. Média	p-valor	Limite Inf.	Limite Sup.	Significativo?
A	B	12,0	0,0004	6,25	17,75	✓ Sim
A	C	24,0	0,0000	18,25	29,75	✓ Sim
B	C	12,0	0,0004	6,25	17,75	✓ Sim

Fonte: Autores (2025).

Todos os pares de apresentam diferença significativa com ordem de desempenho $C > B > A$

5. CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo mostrar a importância da Análise de Variância e do Teste de Tukey para cinco amostras independentes em análises de notas. Os resultados comprovaram que existiu de fato diferença entre todas as amostras e as comparações múltiplas mostraram que o desempenho é melhor para o Método C, depois Método B e por último Método A.

REFERENCIAS

- [1] André Vilela Komatsu. (2017). *COMPARAÇÃO DOS PODERES DOS TESTES T DE STUDENT E MANWHITNEY WILCOXON PELO MÉTODO DE MONTE CARLO*. VI, 121–127.
- [2] Machado, G. A.; Lima, M. I. S. (2011). *Estatística aplicada às ciências ambientais*. Blucher.
- [3] Nascimento, W. M., Barros, B. C. G., & Pessoa, H. B. S. V. (1993). Teste de envelhecimento acelerado em sementes de tomate. *Revista Brasileira de Sementes*, 15(2), 251–253. <https://doi.org/10.17801/0101-3122/rbs.v15n2p251-253>
- [4] Paese, C., Caten, C. ten, & Ribeiro, J. L. D. (2001). Aplicação da análise de variância na implantação do CEP. *Production*, 11(1), 17–26. <https://doi.org/10.1590/s0103-65132001000100002>
- [5] Rezende, M. D., Rosa, C. S. da, Cardoso, R. P., Reis, J. S. da M., & Sampaio, N. A. de S. (2023). Statistics as a Tool for Decision Making in Agricultural and Environmental Experiments. *Revista de Gestão e Secretariado*, 14(4), 5204–5217. <https://doi.org/10.7769/gesec.v14i4.1978>
- [6] Sampaio, N. A. de S., Reis, J. S. da M., Espuny, M., Cardoso, R. P., Gomes, F. M., Pereira, F. M., Ferreira, L. C., Barbosa, M., Santos, G., & Silva, M. B. (2022). Contributions to the future of metaheuristics in the contours of scientific development. *Gestão & Produção*, 29(1), 1–19. <https://doi.org/10.1590/1806-9649-2022v29e099>
- [7] Scholz, F. W., & Stephens, M. A. (2012). K-Sample Anderson–Darling Tests. *Journal of the American Statistical Association*, 82(399).
- [8] Stoker, P., Tian, G., & Kim, J. Y. (2020). Analysis of variance (Anova). *Basic Quantitative Research Methods for Urban Planners*, 197–219. <https://doi.org/10.4324/9780429325021-11>

Capítulo 6

Indústria 4.0 na construção civil: potencialidades e aplicações da robótica

Helloise Rosene

Karen Niccoli Ramirez

Resumo: A indústria 4.0 vem transformando os setores produtivos com tecnologias como IoT - *Internet das Coisas*, BIM - *Building Information*, Inteligência Artificial - IA e Robótica. Este capítulo investiga as potencialidades da robótica na construção civil, avaliando sua integração com a Indústria 4.0, suas aplicações e implicações práticas. A metodologia adotada baseou-se em revisão bibliográfica, apresentação de casos reais, aplicação da *Quality Assurance* - Matriz QA e Análise *SWOT* - *Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats*. Foram identificados 49 robôs, em âmbito nacional e internacional, aplicados em estruturas, geotecnia, saneamento e transportes.

Palavras-chave: Indústria 4.0, Construção Civil, Inovação, Robótica.

1. INTRODUÇÃO

A construção civil, setor estratégico da economia mundial, enfrenta desafios históricos relacionados à baixa produtividade, desperdício de materiais e elevados índices de acidentes de trabalho (Dias, 2023; Gomes, 2023). Essa realidade limita a competitividade do setor, sobretudo em contextos em que ainda predominam métodos construtivos convencionais. As ferramentas tecnológicas oferecem oportunidade de modernização, contribuindo para maior eficiência, sustentabilidade e segurança, representando uma ruptura paradigmática ao introduzir tecnologias digitais e físicas que remodelam os processos produtivos (Amorim; Oliveira, 2023). A Indústria 4.0 caracterizada pela convergência de tecnologias digitais e sistemas ciberfísicos, apresenta-se como resposta a esses desafios, ao integrar Internet das Coisas, Inteligência Artificial, Big Data e o BIM - *Building Information Modeling* em uma mesma lógica produtiva (Zhang, 2020). No interior desse novo paradigma, a robótica ocupa posição de destaque. Mais do que substituir trabalhadores, os robôs ampliam a capacidade produtiva e introduzem maior integração entre planejamento digital e execução prática (Amorim; Oliveira, 2023).

Conforme tabela 1 - Robôs na engenharia civil constam os robôs considerados ao longo do desenvolvimento deste capítulo. Exemplos emblemáticos como o Hadrian X, desenvolvido na Austrália para alvenaria automatizada (Peters, 2023), ou o Spot, da Boston Dynamics, destinado a inspeção de campo com mobilidade quadrúpede (Boston Dynamics, 2023), ilustram como a automação tem sido aplicada de forma bem-sucedida em diferentes etapas do processo construtivo. Essas experiências demonstram que a construção civil pode se alinhar a tendências internacionais e sustentabilidade (Benassi, 2023).

Tabela 1 – Robôs na engenharia civil

Nº	Nome do Robô	País
1	Hadrian X	Austrália
2	Spot	EUA
3	Mule - ML 150	EUA
4	HRP-5P	Japão
5	Hilti Jaibot	Liechtenstein
6	HP SitePrint	EUA
7	In-situ Fabricator	Suíça
8	Explorer Snaké-Arm	EUA
9	HyQ	Itália
10	ANYmal	Suíça
11	AirBurr	Suíça
12	RPD 35	EUA
13	Hilti PLT 300	Liechtenstein
14	Optimus	EUA
15	Unitree Go2 Pro	China
16	Robôs Subaquáticos	-
17	Cazza X1	EUA
18	SAM 100	EUA
19	Tybot	EUA
20	IronBOT	EUA
21	Fastbrick Wallbot	Austrália
22	Semi-Automated Mason	EUA
23	TopCon LN-150	EUA / Japão
24	Daxel.ai Robot	EUA
25	Atlas	EUA
26	C3D-Construction 3D	França
27	Concrete Printing Robot	Rússia / EUA

Tabela 1 – Robôs na engenharia civil (continuação)

Nº	Nome do Robô	País
28	Dusty Robotics FieldPrinter	EUA
29	SiteSense	Canadá
30	Hadrian 105	Austrália
31	LayoutBot	EUA
32	Skycatch Drone	EUA
33	Trimble XR 10	EUA
34	Rebar Tying Robot	Japão
35	Layout Roomba	EUA
36	Mapeamento 3D UAV	-
37	Promobot	Rússia
38	Husky UGV	Canadá
39	BIMBot	EUA
40	Widcat	EUA
41	MiniCheetah	EUA
42	Digital Twin Drone	-
43	Robotics TOTAL STATION	-
44	Tiling Robot	Japão
45	Drywall Robot	Japão
46	Scaffold Builder Robot	Suíça
47	Rebar Bending Robot	China
48	Concrete Finishing Robot	EUA
49	Concrete Spraying Robot	Suíça / Itália

Fonte: Os dados utilizados na composição na tabela foram extraídos a partir de repositórios técnicos de fabricantes, dissertações, teses, artigos acadêmicos, conforme referências listadas ao longo deste capítulo adaptadas pelos autores (2025).

Entre essas inovações, a robótica emerge como setor estratégico, capaz de transformar práticas tradicionais marcadas por baixa eficiência e altos índices de acidentes em um ambiente mais preciso, sustentável e seguro (Dias, 2023, Gomes, 2023). Este capítulo representa um estudo abrangente sobre a aplicação de robôs na construção civil, com base em revisão bibliográfica sistemática e na catalogação de quarenta e nove equipamentos desenvolvidos em diferentes países. A investigação demonstra que a robótica contribuiu para ganhos expressivos em produtividade e qualidade (Peters, 2023), embora enfrente barreiras econômicas, normativas culturais, especialmente no contexto brasileiro (Singh, 2023). Para fundamentar a análise, foram empregadas ferramentas como a Análise SWOT apresentada na Figura 1 – Análise SWOT associada a Indústria 4.0 e Construção Civil com foco em aplicações na robótica (Oliveira, 2019).

Figura 1 – Análise SWOT associada a Indústria 4.0 e Construção Civil com foco em aplicações na robótica



Fonte: Silva (2021); Oliveira (2020); Pereira & Santos (2022), adaptado autores (2025).

Juntamente com a Matriz QA (Martins, 2023), possibilitou-se avaliar tanto os potenciais quanto as limitações do uso de robôs. Os resultados apontam que a automatização aplicada à construção civil não substitui a mão de obra humana, mas se configura como recurso colaborativo (Boston Dynamics, 2024), promovendo avanços alinhados às demandas contemporâneas de sustentabilidade (Benassi, 2023).

Contudo, a geotecnia desempenha papel estratégico na construção civil ao lidar com solos, rochas e a interação entre infraestrutura e o meio natural. No entanto, os desafios relacionados à instabilidade de taludes, riscos em túneis e galerias subterrâneas, além da necessidade de inspeção em ambientes de difícil acesso, evidenciam limitações ao integrar tecnologias digitais, sensoriamento remoto e robótica (Zhang, 2020; Chen, 2024).

A análise crítica apresentada destaca na distribuição dos robôs aplicados na construção civil por área, relacionados diretamente ao monitoramento de encostas, inspeção de túneis e operações em áreas de risco. Foram identificados avanços significativos em segurança e precisão, embora os custos e a maturidade tecnológica ainda representem obstáculos. Os resultados demonstram que os drones, veículos autônomos e robôs subaquáticos já ampliam a capacidade de diagnóstico e prevenção em geotecnia, configurando-se como recursos essenciais para obras subterrâneas e sistemas de resiliência urbana.

A engenharia geotécnica constitui uma das áreas mais críticas da construção civil, envolvendo a análise de solos, taludes, encostas e obras subterrâneas. Os acidentes relacionados a deslizamentos de terra, rupturas de barragens e colapsos em túneis demonstram a complexidade dos problemas enfrentados e a necessidade de monitoramento constante (Dias, 2023; Gomes, 2023). Tradicionalmente tais processos são baseados em inspeções visuais e instrumentos pontuais, como inclinômetro e piezômetros, que embora úteis, apresentam limitações de alcance, em tempo de resposta

e segurança aos trabalhadores. Nesse contexto a Indústria 4.0 abre espaço às práticas geotécnicas. Drones equipados com sensores LiDAR - *Light Detection and Ranging* e câmeras de profundidade permitem mapeamentos tridimensionais de encostas com elevada precisão (Chen, 2024).

Robôs como AirBurr, desenvolvido na *École Polytechnique Fédérale* de Lusane, foram projetados para explorar ambientes confinados, como túneis e galerias (EPFL, 2010). Além disso, veículos subaquáticos autônomos possibilitam inspeções em redes de drenagem e barragens, garantindo diagnósticos em locais antes inacessíveis (Albuquerque; Pereira, 2021). As tecnologias digitais e físicas como IoT, IA, computação em nuvem, Big Data, BIM, manufatura aditiva e robótica, ampliam a capacidade de prevenção e de resposta rápida, sendo fundamental para um setor que precisa lidar tanto com riscos naturais quanto com a pressão por obras mais seguras e sustentáveis, afetando diretamente e positivamente a produtividade e qualidade (Benassi, 2023).

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste capítulo é investigar o papel da robótica na construção civil no contexto da Indústria 4.0 aplicada no contexto atual, buscando compreender como essas tecnologias podem contribuir para superar desafios históricos relacionados ao monitoramento, à execução e segurança no campo de infraestrutura e fundações.

Como objetivos específicos, buscou-se analisar como robôs e sistemas automatizados podem otimizar atividades como ensaios, mapeamento e monitoramento de taludes e encostas, inspeção em ambientes de risco, perfuração, instrumentação e monitoramento geotécnico em tempo real. Avaliar suas aplicações, impactos e limitações, com a catalogação de robôs aplicados ao setor da construção, identificando suas tecnologias e funcionalidades e evidenciando os impactos em produtividade, segurança e sustentabilidade, com a identificação das oportunidades e desafios implementados no Brasil. Por fim evidenciar as oportunidades e desafios para implementação desses sistemas no Brasil, especialmente no contexto de obras urbanas e de infraestrutura crítica, avaliando em que medidas a robótica pode promover maior eficiência, produtividade, sustentabilidade e segurança em operações de caráter geotécnico (Moura, 2023); (Costa; Branco, 2020).

3. METODOLOGIA

Conduzido por meio de uma abordagem qualitativa, com caráter exploratório e de natureza aplicada, a investigação fundamentou-se, inicialmente, em revisão bibliográfica sistemática, em bases nacionais e internacionais como Scopus, SciELO, além de consultar dissertações, teses, normas técnicas e relatórios de fabricantes conforme Figura 2 – Plano de desenvolvimento (Gil, 2019). Esse levantamento permitiu consolidar o estado da arte acerca da Indústria 4.0, e particularmente, da robótica voltada a engenharia civil no campo da geotecnia (Amorim. Oliveira; 2021); (Moura, 2023).

Figura 2 – Plano de desenvolvimento

Fonte: Autores (2025).

A metodologia se deu pelo levantamento documental de robôs aplicados à construção civil, combinados à estudos de caso e aplicação da análise crítica por meio da Análise SWOT, empregada para identificar as potencialidades, limitações, oportunidades e ameaças relacionadas a adoção da robótica na construção civil, considerando critérios nacionais e sobretudo internacionais. Adjunto, houve a aplicação da Matriz QA, adaptada ao cenário de engenharia civil para que houvesse a possibilidade de avaliação de desempenho dos robôs segundo cinco dimensões, dadas por eficiência, segurança, integração digital, sustentabilidade e custos (Silva; Santos. 2023).

Foram selecionados estudos de caso representativos para aprofundar a análise, e entre eles destacam-se o Hadrian-X, voltado para impressão automatizada de blocos, o Hilti Jaibot, aplicado em perfurações e mapeamentos de alta precisão integradas a projetos BIM; o Spot, utilizado em inspeções e mapeamentos tridimensionais por meio de sensores LiDAR, assim como o AirBurr, desenvolvido para levantamentos e ambientes de risco geotécnico. A escolha desses casos se deve ao fato de representarem diferentes áreas da engenharia civil, evidenciando impactos concretos em produtividade, segurança e sustentabilidade, onde pode-se realizar um levantamento com amplitude em inspeções estruturais, operações de saneamento, transporte e o centro deste capítulo o monitoramento geotécnico (Albuquerque, Pereira, 2021).

A integração entre revisão bibliográfica, catalogação documental, análise estratégica e estudos de caso permitiu construir uma visão abrangente acerca da robótica na construção civil, fornecendo bases consistentes para discussão dos resultados para a formulação de recomendações voltadas à realidade brasileira.

4. RESULTADOS

Para alcançar esse propósito, houve a identificação e catalogação de diferentes robôs utilizados nas diferentes áreas da construção como na geotecnia internacionalmente, descrevendo suas funcionalidades, tecnologias, países de origem e aplicações práticas, como sondagens, prospecção de solos, estabilização de taludes, monitoramento de barragens e túneis. Além disso, buscou-se analisar criticamente os impactos positivos e as limitações de sua adoção, considerando aspectos econômicos ligados aos custos de implementação e manutenção; bem como visou-se analisar a precisão de dados, integração com sensores IoT e BIM.

De forma aplicada, avaliou-se como robôs podem contribuir em tarefas como sondagens e perfurações automatizadas, que aumentam a velocidade e reduzem erros humanos. Como drones e veículos terrestres equipados com os sensores LiDAR e câmeras de alta resolução são capazes de gerar modelos digitais do terreno no campo do mapeamento de encostas e taludes. No que diz respeito ao monitoramento de encostas e taludes pode-se identificar como é possível prevenir rupturas ou deformações, através de robôs subaquáticos e sistemas móveis que coletam dados em tempo real, permitindo prevenir rupturas ou deformações. Assim como no que se refere a instrumentação geotécnica integrada a IoT, que conecta sensores de recalque, piezômetros e inclinômetro a sistemas automatizados para alertas imediatos, descrevendo os impactos positivos das aplicações existentes e provenientes da adoção da robótica, como por meio da promoção de segurança aos trabalhadores, fazendo com que haja aumento da produtividade e precisão de dados, também suas limitações como alto custo inicial e a necessidade de capacitação técnica.

Os resultados mostram que a robótica vem sendo incorporada de forma crescente à construção civil em diferentes frentes, com destaque para execução de obras, inspeções estruturais e atividades de monitoramento geotécnico. A catalogação de 49 robôs evidenciou soluções diversas, desde equipamentos voltados à alvenaria por meio dos robôs SAM100 e Hadrian, até sistemas de inspeção, aplicados no AirBurr e Spot, chegando a tecnologias aplicadas a grandes estruturas, como o robô TyBot e à impressão digital de layouts arquitetônicos, como SitePrint. Na tabela 2 – Distribuição de robôs por área constam alguns exemplos.

Tabela 2 – Distribuição de robôs por área

Área da Engenharia Civil	Exemplos de Robôs	Função principal
Estruturas	Hadrian X e Hilti Jaibot	Alvenaria e perfuração
Geotecnia	AirBurr, ANYmal e Explorer Snake-Arm	Monitoramento de encostas, inspeção em túneis
Saneamento	Robôs subaquáticos: Blue ROV	Inspeção de redes e pontes submersas
Transportes	Unitree Go2, MiR 250	Logística, sinalização e inspeção de pontes e túneis

Fonte: Autores (2025).

Diferentes robôs empregados na construção civil, com distintos níveis de automação, autonomia e aplicações, confirmam que a robótica contribui diretamente para ganhos de produtividade, segurança e precisão, ao mesmo tempo que reduz desperdícios de materiais e amplia práticas sustentáveis (Built Robotics, 2025).

Observou-se predominância com impressão 3D, alvenaria automatizada, marcação de *layout*, cravação de estacas, transporte de materiais, monitoramento de canteiros, inspeção estrutural e montagem de componentes (Construction Robotics, 2023); (HP, 2025). Contudo, também emergiram limitações relevantes, como alto custo de aquisição, a dependência de capacitação especializada e a ausência de regulamentação específico no contexto brasileiro.

Sob outra perspectiva, os resultados apontam que a introdução da robótica não deve ser vista apenas como estratégia tecnológica, mas também como um processo de transformação cultural no setor. A resistência por parte da mão de obra à automação, os impactos sobre modelos tradicionais de emprego e a necessidade de políticas públicas de incentivo representam fatores estratégicos que condicionam sua adoção.

A Matriz QA apontou impacto positivo nos critérios de produtividade, precisão e integração com tecnologias digitais como BIM e sensores LiDAR. Houve padronização de serviços, economia de tempo e redução do desgaste físico humano (Vianna, 2021). A análise SWOT destacou pontos fortes como inovação tecnológica e o ganho de competitividade, fraquezas através do custo elevado e baixo domínio técnico nacional. Como oportunidades, a digitalização crescente e valorização da segurança, já para as ameaças há resistência à mudança e a escassez de mão de obra qualificada (Pereira, 2022).

O estudo indica que a adoção das tecnologias robóticas não é totalmente disseminada e prevalece em empresas ou projetos de infraestrutura, mas tendências de expansão para empreendimentos médios, impulsionada por robôs colaborativos e soluções modulares (Souza, 2023). Dentre as propostas de melhoria contínua, propõem-se ferramentas e *softwares* de modelagem BIM, análise preditiva com *machine learning*, matriz de planejamento estratégico e tecnologia de simulação em nuvem.

Em síntese, a robótica pode ser compreendida como recursos colaborativo e que fortalece a modernização do setor e abre oportunidades para novos arranjos produtivos. Ao mesmo tempo, exige planejamento, capacitação e regulação, de modo que sua incorporação se dê de forma equilibrada entre inovação, competitividade e responsabilidade social (Hammes, 2025).

4.1. PANORAMA DA ROBÓTICA NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O levantamento realizado mostrou que a robótica tem avanços de maneira consistente no setor da construção civil, cobrindo desde tarefas básicas de execução até operações de alta complexidade em ambientes de risco. No total foram identificados quarenta e nove robôs com diferentes níveis de maturidade tecnológica, alguns dos mais representativos no campo da geotecnia, apresentados conforme Tabela 3 – Distribuição dos robôs aplicados na construção civil. Com isso, o avanço da robótica aplicada a geotecnia pode ser observado em três frentes principais: mapeamento aéreo de encostas, inspeção subterrânea e monitoramento subaquático.

Tabela 3 – Distribuição dos robôs aplicados na construção civil

Nome	País	Aplicação	Função	Tecnologias	Objetivo Principal
Hadrian X	França	Movimentação de cargas	Verificação de integridade	IoT	Precisão na execução
Spot	China	Monitoramento de canteiro	Acompanhamento de progresso de obra	LiDAR	Precisão na execução
TyBot	Brasil	Impressão 3D de concreto	Inspeção visual	BIM Integrado	Padronização de processos
SAM 100	Suécia	Construção modular	Mapeamento 3D	IA	Redução de mão de obra
Jaibot	Brasil	Instalações MEP	Mapeamento 3D	IA	Redução de mão de obra
Dusty FieldPrinter	Brasil	Inspeção de fachadas	Mapeamento 3D	BIM Integrado	Padronização de processos
Built Robotics Exosystem	Itália	Inspeção de fachadas	Coleta de dados ambientais	IoT	Sustentabilidade construtiva
SitePrint	Japão	Topografia automatizada	Verificação de integridade	Visão Computacional	Precisão na execução
Go2 Pro	Coreia do Sul	Monitoramento de canteiro	Verificação de integridade	BIM Integrado	Precisão na execução
ANYmal	Canadá	Topografia automatizada	Coleta de dados ambientais	IoT	Precisão na execução
Brodmann X	Estados Unidos	Inspeção de fachadas	Verificação de integridade	Gêmeo Digital	Aumento de produtividade
Doka ConSteel	Canadá	Impressão 3D de concreto	Mapeamento 3D	BIM Integrado	Precisão na execução
Termes	Coreia do Sul	Movimentação de cargas	Inspeção visual	BIM Integrado	Redução de mão de obra
HP Robotics Trace	Brasil	Inspeção de fachadas	Transporte autônomo	IoT	Aumento de produtividade
HEAP Excavator	China	Inspeção de fachadas	Acompanhamento de progresso de obra	Robótica Colaborativa	Sustentabilidade construtiva

Tabela 3 – Distribuição dos robôs aplicados na construção civil (continuação)

Nome	País	Aplicação	Função	Tecnologias	Objetivo Principal
Kewazo Liftbot	Alemanha	Controle de qualidade	Transporte autônomo	IoT	Redução de mão de obra
Hilti PLT 300	Itália	Impressão 3D de concreto	Inspeção visual	IoT	Sustentabilidade construtiva
HRP-5P	França	Topografia automatizada	Coleta de dados ambientais	Visão Computacional	Redução de mão de obra
Fastbrick Hadrian 112	Japão	Impressão 3D de concreto	Mapeamento 3D	Gêmeo Digital	Precisão na execução
FBR Fastwall	Brasil	Análise de vibrações em estruturas	Mapeamento 3D	Visão Computacional	Redução de mão de obra
Robolution	França	Topografia automatizada	Mapeamento 3D	Visão Computacional	Precisão na execução
Robo-Facer	Coreia do Sul	Instalações MEP	Acompanhamento de progresso de obra	Gêmeo Digital	Aumento de produtividade
Q-Bot	Coreia do Sul	Movimentação de cargas	Inspeção visual	IoT	Segurança operacional
GantryPrint	Suécia	Controle de qualidade	Inspeção visual	Visão Computacional	Segurança operacional
XtreeE	Canadá	Impressão 3D de concreto	Transporte autônomo	IoT	Segurança operacional
Apis Cor	França	Impressão 3D de concreto	Inspeção visual	IoT	Padronização de processos
Rebar TyBot	França	Topografia automatizada	Construção automatizada	BIM Integrado	Sustentabilidade construtiva
Printstones	Canadá	Construção modular	Verificação de integridade	LiDAR	Segurança operacional
Trinity Robotic Bricklayer	Brasil	Topografia automatizada	Transporte autônomo	IoT	Segurança operacional
Sawyer	França	Movimentação de cargas	Construção automatizada	BIM Integrado	Padronização de processos

Tabela 3 – Distribuição dos robôs aplicados na construção civil (continuação)

Nome	País	Aplicação	Função	Tecnologias	Objetivo Principal
MiR250	Alemanha	Construção modular	Acompanham ento de progresso de obra	IA	Sustentabilidade construtiva
Scarab Drones	França	Impressão 3D de concreto	Coleta de dados ambientais	IA	Redução de mão de obra
KUKA LBR iiwa	Suécia	Instalações MEP	Construção automatizada	Visão Computacional	Precisão na execução
Mini Cheetah	Itália	Instalações MEP	Inspeção visual	Robótica Colaborativa	Segurança operacional
FARO Focus	Brasil	Instalações MEP	Transporte autônomo	IoT	Sustentabilidade construtiva
SLAMBot	Alemanha	Movimentação de cargas	Transporte autônomo	BIM Integrado	Precisão na execução
Layout Robotics	Coreia do Sul	Corte e soldagem	Verificação de integridade	Visão Computacional	Segurança operacional
Wildcat Robot	Suécia	Topografia automatizada	Transporte autônomo	Visão Computacional	Padronização de processos
DigiRob	Itália	Inspeção de fachadas	Inspeção visual	BIM Integrado	Precisão na execução
Hilti Jaibot 2.0	Coreia do Sul	Monitoramento de canteiro	Construção automatizada	LiDAR	Padronização de processos
Rugged Robotics	Suécia	Instalações MEP	Inspeção visual	Gêmeo Digital	Redução de mão de obra
SkyMul SkyTy	Itália	Topografia automatizada	Coleta de dados ambientais	IA	Padronização de processos
Epson C12XL	Suécia	Controle de qualidade	Mapeamento 3D	Gêmeo Digital	Sustentabilidade construtiva
Mule II	França	Controle de qualidade	Transporte autônomo	Gêmeo Digital	Padronização de processos
EksoZeroG	França	Impressão 3D de concreto	Acompanham ento de progresso de obra	LiDAR	Redução de mão de obra

Tabela 3 – Distribuição dos robôs aplicados na construção civil (continuação)

Nome	País	Aplicação	Função	Tecnologias	Objetivo Principal
Boston Dynamics Stretch	Estados Unidos	Impressão 3D de concreto	Inspeção visual	IoT	Padronização de processos
BIMBot	Alemanha	Monitoramento de canteiro	Transporte autônomo	IoT	Sustentabilidade construtiva
Caterpillar Autonomous Dozer	França	Impressão 3D de concreto	Inspeção visual	Gêmeo Digital	Padronização de processos

Fonte: Os dados utilizados na composição na tabela foram extraídos a partir de repositórios técnicos de fabricantes, dissertações, teses, artigos acadêmicos, conforme referências listadas ao longo deste capítulo adaptadas pelos autores (2025).

A análise SWOT revelou que os principais pontos fortes da robótica residem na elevação da precisão, segurança ampliada e no incremento de produtividade (Santos, 2022). Aplicada à geotecnia, revelou aspectos de força em relação a incrementos de segurança em análise de riscos, maior precisão em levantamentos e capacidade de acesso em locais inacessíveis por seres humanos. Em detrimento das fraquezas, destacam-se a baixa maturidade tecnológicas em alguns equipamentos, custos elevados de aquisição e necessidade de desenvolvimento aplicado a capacitação técnica (Oliveira, 2019).

Como oportunidades surgem os ODS – Objetivos de Desenvolvimento sustentável, uma agenda global criada pela ONU – Organização das Nações Unidas em 2015, que faz parte da chamada Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável onde almeja-se 17 objetivos globais, acompanhados de 169 metas específicas, que visam enfrentar os principais desafios sociais, econômicos e ambientais do mundo, podendo ter alinhamento de políticas, sustentabilidade e a possibilidade de modernizar o setor, como a integração a sistemas de alerta precoce e expansão do uso em mineração e obras subterrâneas (Martins, 2023).

Já as ameaças incluem barreiras como ausência regulatória nacional, resistência cultural no setor e vulnerabilidade em ambientes extremos adversos (Singh, 2023). A Matrix QA mostrou que alguns equipamentos, como Hadrian X e SitePrint, já atingiram alto grau de maturidade tecnológica, enquanto outros, como robôs subaquáticos, ainda carecem de aprimoramento para maior confiabilidade (Albuquerque; Pereira, 2021).

O Hadrian X, desenvolvido pela FBR - *Fastbrick Robotics* na Austrália, é considerado o primeiro robô móvel totalmente automatizado para alvenaria, capaz de erguer paredes estruturais a partir de modelos 3D com elevada velocidade e precisão. Sua tecnologia representa um marco no setor, ao integrar sistemas de navegação, manipulação automatizada de blocos e controle digital do processo construtivo.

A partir de sua análise, foi possível identificar padrões de desempenho que permitiram mapear robôs com características semelhantes de acordo com suas principais funcionalidades e tecnologias, esses equipamentos foram agrupados e ranqueados

segundo critérios de eficiência, segurança e precisão, subsidiando a elaboração de diretrizes práticas para a adoção de tecnologias no setor da construção civil.

Ao considerar todos os robôs catalogados com dados válidos, evita-se viés de seleção e amplia-se o escopo deste capítulo, fator essencial em estudos de caráter exploratório e estratégico sobre automação robótica no contexto brasileiro. Essa abordagem metodológica segue recomendações amplamente reconhecidas na literatura científica de engenharia e inovação tecnológica, como demonstrado nos trabalhos de (Fonseca, 2022); (Martins, 2023) que defendem o uso de análises comparativas e multivariadas na avaliação de tecnologias emergentes.

4.2. DESTAQUES DA ROBÓTICA NA ENGENHARIA CIVIL

As tecnologias embarcadas identificadas nos robôs aplicados à geotecnia demonstram um avanço significativo na integração de recursos digitais, alinhados ao paradigma da Indústria 4.0. Destacam-se um amplo conjunto de recursos avançados como os sensores LiDAR, utilizados para mapeamento 3D de encostas, taludes e áreas de risco, permitindo a construção de modelos digitais de terreno com alta precisão (Moura, 2023). As câmeras RGB e câmeras estéreo oferecem suporte a inspeção visual, e à reconstrução de imagens e superfície, úteis para identificação de fissuras, recalques e movimentações de solo em barragens e taludes (Hammes; Souza, 2023). Sensores ultrassônicos e IR – infravermelhos também se mostram aplicáveis à geotecnia, sendo empregados na detecção de instabilidades, ociosidades subterrâneas e na medição de deformações térmicas em solos e estruturas (Costas; Branco, 2020).

Sistemas de GPS e GNSS aliados a IMU – Unidade de Medição Inercial, oferecem localização e orientação precisa, permitindo o rastreamento contínuo de deslocamentos em áreas sujeitas a escorregamentos, com grande relevância para segurança preventiva (Moura, 2023). A aplicação de IA - Inteligência Artificial e *Machine Learning* - aprendizado de máquina reforça esse cenário ao possibilitar a análise de padrões de movimentação de solos e a predição de falhas estruturais com base em séries históricas de dados coletados por instrumentação geotécnica (Oliveira, 2029). Tecnologias de processamento de imagem e visão computacional tornam viáveis inspeções instantâneas em taludes e em fundações profundas, enquanto sistemas automatizados de perfuração controlados por CNC e atuadores elétricos oferecem precisão em sondagem e ensaios de campo.

Outro aspecto central refere-se ao monitoramento remoto e a tele operação, que permite operar robôs em áreas de difícil acesso, como galerias subterrâneas ou zonas pós rompimentos, garantindo segurança a equipe de campo (Souza, 2023). A integração com plataformas de comunicação em nuvem e o uso de sensores ambientais amplia a capacidade de medição de parâmetros críticos como temperatura, umidade e pressão de poros, essenciais no monitoramento de barragens e solos saturados. Além disso, a interoperabilidade como o BIM – *Building Information Modeling* e gêmeos digitais possibilita a comparação autônoma entre o modelo digital geotécnico e as condições reais do terreno, favorecendo ajustes de projeto e estratégias de manutenção preventiva (Moura, 2023).

Os impactos observados apontam ganhos expressivos de produtividade, segurança e qualidade na área geotécnica, sobretudo em atividades repetitivas, de alto risco e desgaste físico. A aplicação combinada a Análise SWOT e Matriz QA evidencia que, embora a adoção da robótica na geotecnia apresente grande potencial em termos de eficiência e redução de

riscos, ainda enfrenta barreiras como alto custo inicial, necessidade de capacitação especializada e resistência cultural a inovação tecnológica (Hammes; Souza, 2023). Além disso, note-se que a maior concentração de uso desses recursos ocorre em grandes projetos de infraestrutura, o que reforma a desigualdade de acesso entre empresas em diferentes portes (Costa; Branco, 2020).

A tendência futura sugere que a migração para empreendimentos médios e urbanos dependerá de políticas públicas de incentivo, apoio governamental e de estratégias empresariais que promovam a difusão tecnológica, a incorporação de ferramentas como *machine learning* – aprendizado de máquina para simulação em nuvem, previsão de deslocamentos e ampliação do escopo de atuação em fundações, taludes e barragens mostra-se viável, mas exige investimento contínuo em capacitação técnica, integração com práticas construtivas consolidadas e fortalecimento de um ecossistema de inovação acessível à realidade brasileira (Moura, 2023); (Oliveira, 2019).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A robótica revela-se como ferramenta estratégica para a evolução da geotecnia no contexto da Indústria 4.0, desempenhando papel fundamental na ampliação da produtividade, na segurança de trabalhadores e na sustentabilidade de obras de infraestrutura. O levantamento realizado por meio da Matriz QA e da Análise SWOT confirma um cenário promissor para a aplicação dessas tecnologias no Brasil, desde que barreiras estruturais sejam enfrentadas, como o alto custo inicial, a carência de profissionais qualificados e a resistência cultural à inovação (Hammes; Souza, 2023; Costa; Branco, 2020). Para que a adoção se torne efetiva, é necessário estimular programas de capacitação técnica voltados à operação de sistemas automatizados e instrumentação avançada, além do desenvolvimento de políticas públicas que incentivem a automação em obras de geotecnia, a criação de normas técnicas específicas e o fortalecimento de parcerias entre universidades, centros de pesquisa e empresas do setor (Moura, 2023).

Entende-se que a incorporação da robótica em atividades como sondagens, inspeção de taludes, monitoramento de barragens e instrumentação automatizada pode transformar a prática geotécnica ao possibilitar maior precisão nos dados, respostas rápidas em situações críticas e redução do risco humano em ambientes de difícil acesso. Contudo, o avanço dependerá de um ecossistema de inovação que democratize o acesso às tecnologias, ampliando sua utilização não apenas em grandes obras, mas também em empreendimentos médios e urbanos, tradicionalmente mais limitados em recursos tecnológicos (Oliveira, 2019).

Os resultados contribuem para a realização de estudos comparativos entre diferentes soluções robóticas em canteiros de obras reais, a elaboração de métricas padronizadas de desempenho aplicáveis à geotecnia e a investigação de modelos de negócios que tornem viável a adoção por pequenas e médias empresas. Além disso, o aprofundamento da análise sobre os impactos socioeconômicos da robótica, com atenção especial à geração de empregos qualificados, à redução de acidentes de trabalho em escavações e barragens, e ao desempenho ambiental de intervenções geotécnicas, sobretudo no que se refere ao uso eficiente de recursos e mitigação de impactos em áreas sensíveis (Souza, 2023; Moura, 2023). Ao conjugar inovação tecnológica, formação profissional e governança estratégica, a geotecnia brasileira poderá transitar para um modelo mais inteligente, colaborativo e sustentável, consolidando-se como protagonista na era da Indústria 4.0.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao PIBIC/PUC-SP pelo financiamento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] Albuquerque, R. C.; Pereira, A. M. Tecnologias Avançadas na Construção Civil: O Papel da Robótica na Solução de Desafios. **Revista de Engenharia Civil**, v. 7, n.2, p. 50-65, 2021.
- [2] ALMEIDA, F. S.; SANTOS, L. M. Robótica na Construção Civil: Potencialidades e Desafios na Era da Indústria 4.0. **Revista Brasileira de Engenharia de Produção**. v. 8, n. 3, p.102-118, 2020.
- [3] ALMEIDA, J. P.; SOUSA, F. R. Gestão da Qualidade na construção Civil: Uma revisão das Principais Ferramentas Aplicadas no Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Civil**, v. 16, n. 3, p. 112-130, 2020.
- [4] AMORIM, LSG de; OLIVEIRA, HHN de. **A transformação digital do setor produtivo da construção civil**. Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 6, p. 574001-57414, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n6-239> Acesso em: 24 fev. 2025.
- [5] BENASSI, A. de A. **Modelagem e simulação combinada com a metodologia lean seis sigma para melhoria de processos**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023. Disponível em: <http://bibliotecatede.uninove.br/handle/tede/3172>. Acesso em: 12 mar. 2025.
- [6] BR WORK. **Robótica na Construção Civil: Tendências e Benefícios**. Disponível em: <https://www.brwk.com.br>, 2024.
- [7] BRITO, A. L. ALVES, M. F. Automação na Construção Civil Brasileira: Benefícios e Desafios para Empresas do Setor. **Revista de Engenharia e Inovação**, v. 8, n. 2, p. 45-60, 2019.
- [8] BUILT ROBOTICS. **RPD 35: robô de cravação de estacas autônomo**. 2023. Disponível em: <https://www.builtrobotics.com>. Acesso em: 9 mar. 2025.
- [9] CHEN, T. **Captura e visualização automatizada da realidade para monitoramento do progresso da construção**. Disponível em: <https://arxiv.org>. Acesso em: 4 dez. 2024
- [10] CONSTRUCTION ROBOTICS. **MULE ML 150**. 2023. Disponível em : <https://www.construction-robotics.com>. Acesso em: 9 mar. 2025
- [11] COSTA, M. FERREIRA, L. S. **Infraestrutura e pesquisa científica: desafios e perspectivas**. Revista Brasileira de Ciência e Tecnologia, v. 5, n. 2, p. 45-62, 2021
- [12] COSTA, P. R.; RIBEIRO, T. F. **Inteligência Artificial na Construção Civil: Panoramas e Desafios no Brasil**. Anais do Congresso Nacional de Engenharia, 2019.
- [13] COSTA, R. M, 7 Branco, J. C. (Eds.). **Robótica e Automação na Indústria 4.0**. Editora UFSC, 2020.
- [14] CRUZ, Mariana C. **Implementação de sistema de layout automatizado com Site Print em obras residenciais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2024. Disponível em: https://repositorio.ufba.br/bitstream/ri/41159/1/Tese_Doutorado_Adilson_Brito_de_Arruda_Filho.pdf. Acesso em: 18 jun. 2025.
- [15] DEMO, Pedro. **Metodologia para quem quer aprender**. São Paulo: Atlas, 2000. 160 p. ISBN 978-85-224-3887-0.
- [16] DEMO, Pierre. **Pesquisa e formação científica**. ed. rev. e ampl. São Paulo: Cortez, 2022. 220 p. ISBN 978-85-249-3471-1.
- [17] DIAS, T. From Data to Action: **Exploring AI and IoT-driven Solutions for Smarter Cities**. 2023. DOI 10.1007/978-3-031-38333-55. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2306.04653>. Acesso em: 1 mar. 2025.
- [18] FERREIRA, Júlia; OLIVEIRA, Pedro. Desafios da adoção da Indústria 4.0 na construção civil brasileira. **Revista Gestão e Tecnologia**, v.21, n. 3; p.45-59, 2021.
- [19] FBR LIMITED. **Next Generation Hadrian X**. Perth, 2023. Disponível em www.fbr.com.au. Acesso

em: 28 jun. 2025.

- [20] FONSECA, L. A.; CARVALHO, R. A. Metodologia Qualitativa Aplicada à Construção Civil: Entrevistas com Profissionais do Setor. **Revista Brasileira de Pesquisa em Engenharia**. v. 10, n. 1, p. 78-95, 2018.
- [21] GARCIA, Maria; HERNANDEZ, Luis. Field evolution of Apis Cor concrete 3D printer. **Automation in Construction**, v 150, 2023.
- [22] GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2019. 200 p. ISBN 978-224-7334-6.
- [23] GOMES, A. B.; SANTOS, C. D. Interdisciplinaridade na Pesquisa em Robótica na Construção Civil: Avanços e Perspectivas. **Revista Brasileira de Engenharia Civil**. v. 9, n. 3, p. 78-92, 2022.
- [24] GOMES, L. F. **Modelo conceitual das relações das tecnologias digitais da indústria 4.0 com gestão de cadeia de suprimentos sustentável**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade estadual de Campinas, 2023. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/NOVE_5a864c7198a83ea5027aab6adc4a076a. Acesso em: 1 mar. 2025
- [25] HAMMES, G; SOUZA, ED de; RODRIGUEZ, CMT. **Avaliação de desempenho da logística reversa no setor da construção civil**. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/351543658_Avaliacao_de_desempenho_da_logistica_reversa_no_setor_da_construcao_civil. Acesso em: 26 fev. 2025.
- [26] LOPES, C. F.; MARTINS, D. S. Publicação Científica no Brasil: A importância da Divulgação de Pesquisas em Engenharia. **Revista Brasileira de Pesquisa e Desenvolvimento**, v. 12, n. 4, p. 34-50, 2020.
- [27] LOPES, J. R.; MOREIRA, T. P. Metodologia científica e desafios da pesquisa no Brasil. **Caderno Acadêmico de Pesquisa**, v. 10, n. 1, p. 89-104, 2023.
- [28] MACHADO, M. A. S. BANON, G. J. F.; MARANGONI, R. D. **Robótica na Indústria da Construção Civil: benefícios e desafios**. Editora ABC, São Paulo, 2020.
- [29] MARCONI, Marina de Andrade; Lakatos, Eva Maria. **Técnicas de Pesquisa: planejamento e execução de pesquisa, amostragens e técnicas de pesquisa; elaboração, análise e interpretação de dados**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2012. 312 p.
- [30] MARTIM, A. da S. **Robô colaborativo em montagem de motores: uma abordagem socioeconômica do avanço tecnológico em manufatura**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2023. Disponível em: <http://bibliotecatede.uninove.br/handle/tede/3173>. Acesso em: 28 mai, 2025.
- [31] MEIRELLES JUNIOR, J.C de et al.. Impactos da indústria 4.0 na construção civil brasileira. **Brazilian Journal of Development**, v.5, 17 out. 2019. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/3881>. Acesso em: 22 jan. 2025
- [32] MOGHADAS, M.; KHOSRAVI, M.; SHAFIEEZHADEH, A. Robotics in construction: A review of autonomous robotic systems and future trends. **Automation in Construction**, v. 129, 103847, 2021.
- [33] MOTTA, W.H; VIEIRA, D.V.R; LIMA, F.V.R. Aplicação da economia circular na construção civil. **Research, Society and Development**, v. 8, n. 7, 2019. Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Disponível em: <https://www.redalyc.org/journal/5606/560662198009/560662198009.pdf>. Acesso em: 28 fev. 2025.
- [34] MOURA, L.M. **Construção 4.0: proposta de inovações tecnológicas digitais para o setor da construção civil - estudo de caso de uma Smart House**. 2023. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2023. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/1164661>. Acesso em: 12 fev. 2025.
- [35] SEVERINO, Antônio Joaquim. **Metodologia do Trabalho Científico**. 24. ed. rev. e atual. São Paulo: Cortez, 2016. 317 p. ISBN 978-85-249-2448-4.
- [36] SILVA, A. B.; SANTOS, C. D. Tendências e Desafios da Robótica na Construção Civil: Uma Revisão da Literatura. In: Congresso Nacional de Engenharia Civil, 2023, Rio de Janeiro. **Anais do Congresso Nacional de Engenharia Civil**. Rio de Janeiro: Editora Engenharia, 2023.
- [37] SILVA, F. A.; SANTOS, L. M. Contribuições da Iniciação Científica para o Avanço Tecnológico na

Construção Civil: Uma Perspetiva na Era da Indústria 4.0. **Revista Brasileira de Engenharia Civil**. v.11, n.1, p. 30-45, 2023.

[38] SILVA, G. H. **Redes de pesquisa e desenvolvimento acadêmico**. Jornal de Ciências Aplicadas, v. 6, n. 4, p. 75-90, 2019.

[39] SILVA, R. T.; MEDEIROS, P. C.; ALMEIDA, G. M. **Automação e Robótica na Construção Civil: Estudos de Caso no Brasil**. Anais do Encontro Nacional de Engenharia Civil, 2020.

[40] SILVA, João Pedro. **Análise SWOT como ferramenta de planejamento estratégico: um estudo de caso em uma empresa de construção civil**. 2018. Dissertação (Mestrado em Administração) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

[41] ZHANG, Y. et al. **Robótica e IA na construção: tecnologias emergentes e tendências**. Automation in construction, v 115, 2020.

Capítulo 7

Estudo de pórticos metálicos com ênfase na semirrigidez das ligações e efeitos de segunda ordem

Davi Carlos de Meneses

Leonardo Melo Bezerra

Resumo: Neste trabalho, é apresentada a análise estrutural de um pórtico metálico, investigando-se a influência de ligações específicas entre vigas e pilares metálicos no comportamento global da estrutura, com ênfase na ausência do monolitismo e na consequente redução da rigidez rotacional da ligação. O estudo fundamenta-se em revisão bibliográfica e na utilização de dados experimentais de ensaios disponíveis na literatura, dos quais se extraiu, por meio de análise gráfica de diagramas momento-rotação, a rigidez inicial de propostas de ligação com chapa de topo e parafusos. As ligações, adotadas como referência no modelo, apresentam comportamento semirrígido característico e foram representadas por molas rotacionais elásticas equivalentes. Um pórtico contendo a ligação estudada foi proposto e analisado numericamente por meio do método dos elementos finitos, submetido à ação combinada de cargas horizontais e verticais, incorporando-se ao modelo tanto o comportamento semirrígido da ligação quanto a não linearidade geométrica, levando-se em consideração os efeitos de segunda ordem. O desenvolvimento deste trabalho também visa à compreensão de fundamentos das disciplinas de Mecânica para Engenharia, especialmente no que diz respeito a tópicos como o equilíbrio de corpos rígidos e a distribuição de esforços internos em elementos estruturais, como vigas e pilares. Os resultados evidenciaram que a consideração da semirrigidez das ligações resultou em deslocamentos significativamente maiores no topo do pórtico, quando comparados ao modelo com ligações engastadas, com acréscimos da ordem de 158%. Observou-se ainda que a inclusão dos efeitos de segunda ordem produziu um incremento adicional nos deslocamentos, embora menos expressivo, reforçando que em estruturas mais esbeltas tais efeitos podem se tornar determinantes para a segurança global.

Palavras-chave: ligações semirrígidas, pórticos metálicos, mecânica para engenharia.

1. INTRODUÇÃO

Na engenharia civil contemporânea, a diversidade de materiais estruturais permite múltiplas abordagens para o projeto de edificações, cada uma com suas particularidades e aplicações específicas. No contexto dos sistemas estruturais metálicos, observa-se um crescimento significativo no Brasil, impulsionado por vantagens como rapidez de execução, precisão dimensional e racionalização de materiais. No entanto, um dos desafios cruciais nesse cenário é a escolha e a modelagem das ligações entre vigas e pilares, cujo comportamento influencia diretamente a estabilidade e o desempenho global da estrutura.

As ligações em pórticos metálicos são tradicionalmente classificadas como rígidas, articuladas ou semirrígidas. Enquanto as hipóteses simplificadoras de rótulas perfeitas ou engastamentos ideais são frequentemente adotadas em projetos, a realidade mostra que a maioria das conexões reais exibe um comportamento intermediário, caracterizado pela semirrígidez. Esse fenômeno, amplamente documentado em estudos experimentais, como os de Aggarwal e Coates (1986), evidencia a importância de se considerar as semirrigidezes das ligações para uma análise estrutural mais precisa.

A semirrígidez das ligações não apenas afeta a distribuição de esforços, mas também tem implicações significativas nos efeitos de segunda ordem, que podem amplificar deslocamentos e alterar a resposta da estrutura sob carregamentos. A correta avaliação desses aspectos é essencial para garantir a segurança e a eficiência do projeto, especialmente em estruturas esbeltas ou sob condições de carregamento críticas.

Diante desse contexto, este trabalho propõe investigar o comportamento de ligações semirrígidas em pórticos metálicos planos, com ênfase nos efeitos provenientes da consideração da rigidez efetiva das citadas ligações e também os efeitos de segunda ordem no pórtico analisado. Para tanto, foi elaborado um modelo de elementos finitos, no qual se incorporou nas ligações entre os elementos de barra, a rigidez da ligação viga-pilar. A ligação adotada é com chapa de topo parafusada de acordo com a figura 4.1. Dessa ligação, cujos ensaios experimentais estão disponíveis na literatura, obteve-se a rigidez das ligações através do estudo dos gráficos momento vs. rotação, e representada por rigidez rotacional equivalente. No modelo de análise foi incorporada a não linearidade geométrica com a aplicação conjunta de ações verticais e horizontais e a consideração de grandes deformações.

A relevância deste estudo reside na necessidade de abordagens mais realistas para a modelagem de pórticos metálicos, alinhadas às demandas atuais da engenharia estrutural. Ao integrar conhecimentos teóricos e experimentais, reforçando também os fundamentos tratados na disciplina Mecânica para Engenharia, busca-se oferecer subsídios para o aperfeiçoamento nas análises de estruturas metálicas, destacando aspectos como segurança, economia e desempenho.

2. OBJETIVOS

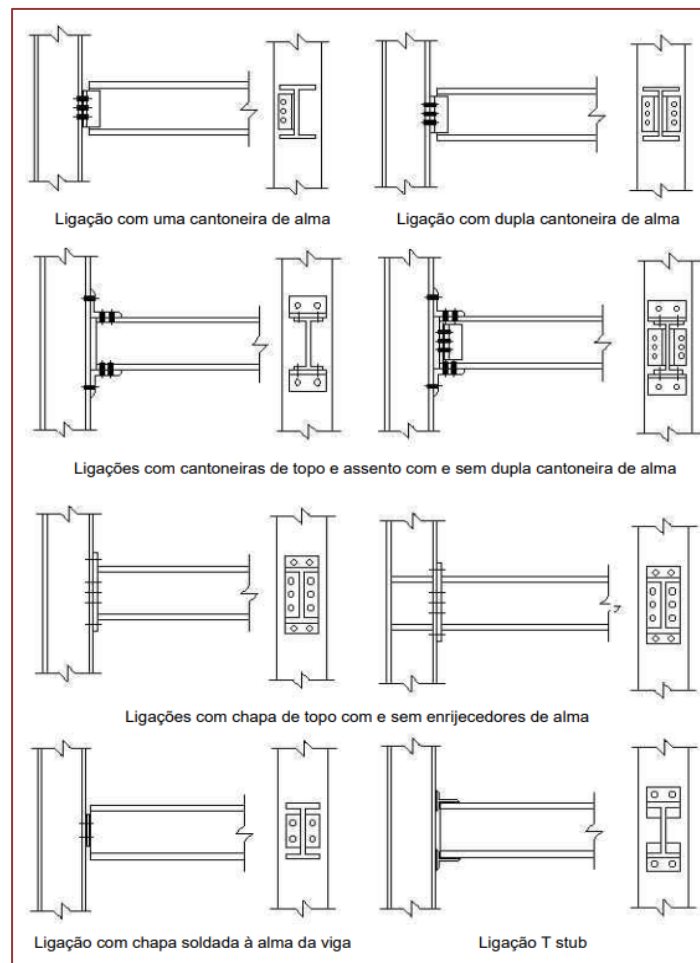
Com um modelo de ligação proposto, o estudo teve como objetivos principais:

- Analisar o comportamento estrutural de um pórtico metálico submetido à ação combinada de cargas, considerando os efeitos de ligações semirrígidas entre vigas e pilares. Busca-se compreender como diferentes graus de rigidez nessas conexões influenciam a estabilidade e os deslocamentos da estrutura, especialmente sob situações críticas de carregamento.
- Investigar, por meio de modelagem computacional e simulações numéricas, a eficácia de abordagens normativas simplificadas na representação do comportamento real da estrutura, contribuindo para o aprimoramento de práticas de projeto e análise em estruturas metálicas.

O estudo comparativo entre a análise não linear e o método simplificado dos coeficientes B1 e B2 tem como finalidade verificar em que medida este última se aproxima da análise mais precisa baseada em segunda ordem.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As ligações semirrígidas têm recebido crescente atenção na engenharia estrutural, principalmente pelo impacto que exercem sobre a estabilidade global e o comportamento resistente das estruturas metálicas. Tradicionalmente, as conexões entre vigas e pilares são tratadas nos modelos estruturais como engastes perfeitos ou rótulas ideais. No entanto, estudos experimentais e numéricos têm demonstrado que a maioria das ligações metálicas reais apresenta um comportamento intermediário entre esses dois extremos, sendo este comportamento definido como semirrígido. Dessa forma, é de suma importância que as ligações sejam tratadas como semirrígidas, aproximando os cálculos à realidade observada de forma experimental. Logo se faz necessário uma modelagem precisa e minuciosa, buscando minimizar erros de análise ao se tentar simular o comportamento real da estrutura.

Figura 3.1 – Ligações Pilar e Viga

Fonte: Santos L. B. (1988).

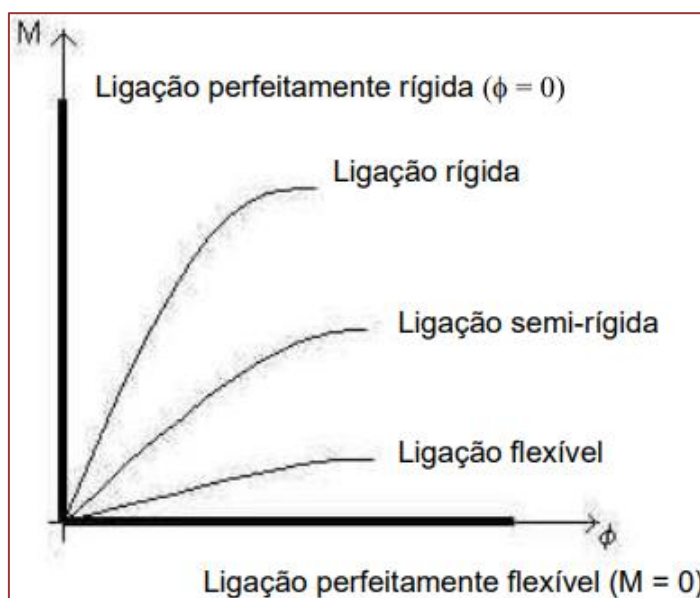
As ligações com chapas de topo parafusadas (end-plate bolted connections) constituem uma solução amplamente empregada em sistemas estruturais metálicos devido à sua execução relativamente simples, boa capacidade resistente e facilidade de padronização. De acordo com Aggarwal e Coates (1986), essas ligações exibem um comportamento semirrígido bem definido, com considerável capacidade de rotação antes da plastificação, especialmente quando se consideram fatores como a espessura da chapa e o tipo de parafuso.

Os autores investigaram oito configurações de ligação, variando parâmetros como espessura da chapa de extremidade (12, 16 e 20 mm), diâmetro dos parafusos (M16, M20, M24) e, em um caso, o comprimento da viga. A ligação identificada como modelo S4, que serve como base para o presente estudo, utilizou chapa de topo com espessura de 16 mm e parafusos M20, conectando uma viga de 800 mm a um pilar metálico. Os ensaios demonstraram que essa ligação transfere eficientemente o momento plástico da viga e apresenta rigidez inicial moderada, condizente com a categoria das conexões semirrígidas. A rigidez rotacional da ligação foi determinada a partir da inclinação da curva momento-rotação no trecho elástico, sendo estimada graficamente em aproximadamente 4285 kN·m/rad.

Além do bom desempenho estrutural, os autores ressaltaram que as ligações com chapa de topo são sensíveis à espessura da chapa: chapas mais delgadas tendem a apresentar maiores deformações e perda de rigidez após o escoamento. O diâmetro dos parafusos também influencia diretamente a ductilidade da ligação, e o comportamento rotacional deve ser considerado em qualquer análise de segunda ordem.

Em complemento ao assunto abordado, Santos L. B. (1998) conduziu uma análise sobre a influência da rigidez das ligações em estruturas de aço, com foco na aplicação em pórticos planos. A principal premissa utilizada é de que substituição de engastes perfeitos por ligações com rigidez realista altera substancialmente os resultados da análise estrutural. Mesmo ligações tratadas como "rígidas" em projeto apresentaram valores de rotação significativos, com estudos feitos a partir dos resultados experimentais de Ribeiro (1997). A análise também mostrou que modelar adequadamente a rigidez da ligação resulta em maior precisão no cálculo de deslocamentos laterais, o que é fundamental em estruturas submetidas a ações horizontais, como o vento.

Figura 3.2 – Classificação das ligações em função da rigidez



Fonte: Santos L. B. (1998).

Mais recentemente, Arruda e Higaki (2018) utilizaram o método das componentes do Eurocode 3:2005 para calcular a rigidez inicial de uma ligação com chapa de topo ajustada. A rigidez determinada, de 5883,6 kN·m/rad, foi inserida em um modelo de pórtico no software ANSYS, permitindo avaliar o impacto dessa ligação no comportamento global da estrutura. Os resultados demonstraram que a substituição de uma ligação idealizada por outra com rigidez real resultou em alterações significativas nos momentos fletores e nos deslocamentos da estrutura, com diferenças superiores a 25% em alguns casos. O fator de rigidez calculado (0,51) posicionou a ligação como semirrígida, conforme a classificação da norma europeia, viabilizando o estudo que se segue neste documento.

Ambos os autores reforçam que, embora a modelagem de ligações semirrígidas fosse evitada no passado devido ao custo computacional, os softwares atuais possibilitam sua

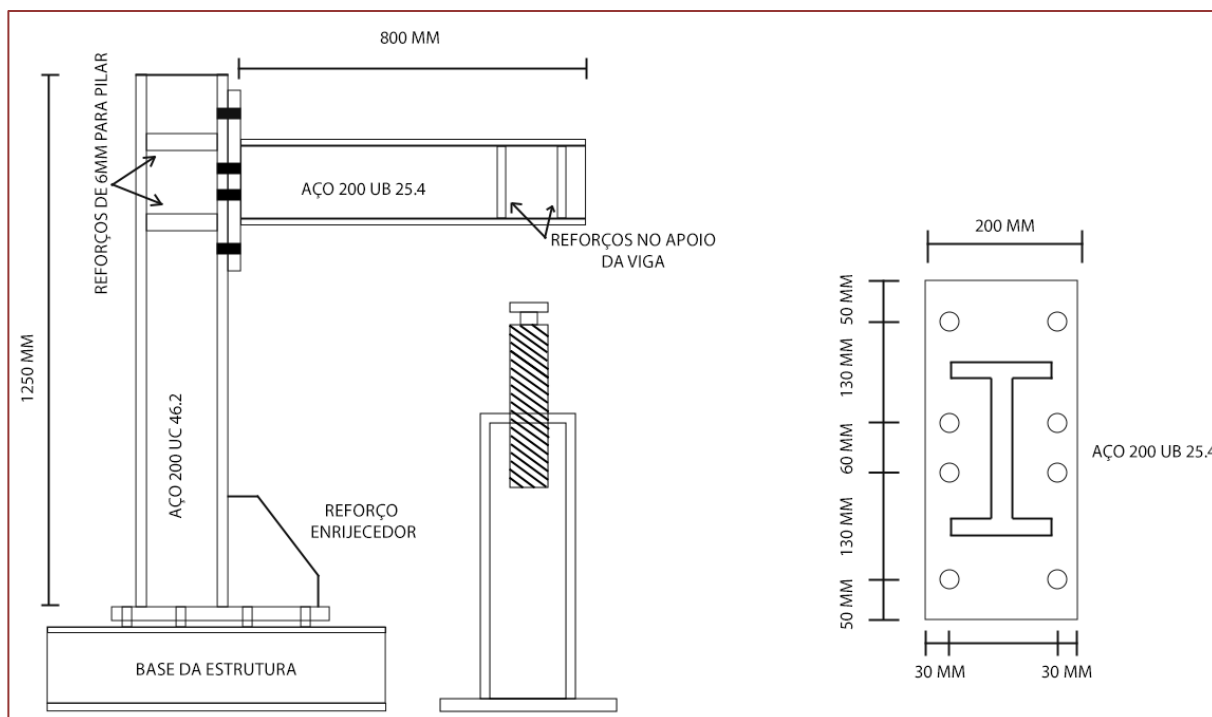
consideração de forma prática, especialmente em análises de segunda ordem. Essa abordagem se alinha com o objetivo deste trabalho, que utiliza no modelo numérico uma ligação real com rigidez rotacional extraída de ensaio, representada por molas rotacionais equivalentes.

Diante disso, fica evidente que o uso de ligações com rigidez rotacional real é não apenas possível, como desejável, tanto por questões de segurança quanto de otimização estrutural. A literatura demonstra de forma clara que, mesmo quando a ligação é concebida como "rígida", sua resposta estrutural real pode distanciar-se significativamente desse ideal. Modelos que consideram a semirrigidez não só refletem melhor a realidade construtiva, como também proporcionam análises mais precisas, coerentes com o comportamento observado em campo e em laboratório.

4. PROPOSTA DE LIGAÇÃO

A ligação estudada neste trabalho é composta por uma viga metálica conectada a um pilar metálico através de uma chapa de topo parafusada, uma configuração amplamente utilizada em estruturas de aço. Esse tipo de ligação permite a transmissão simultânea de esforços de momento fletor e força cortante, por meio da combinação de atrito entre superfícies, resistência dos parafusos e comportamento da chapa. A figura apresenta o detalhamento estudado por Aggarwal e Coates (1986), de um dos modelos de ligação ensaiados.

Figura 4.1 – Detalhamento esquemático da ligação metálica viga–pilar utilizada como objeto de análise

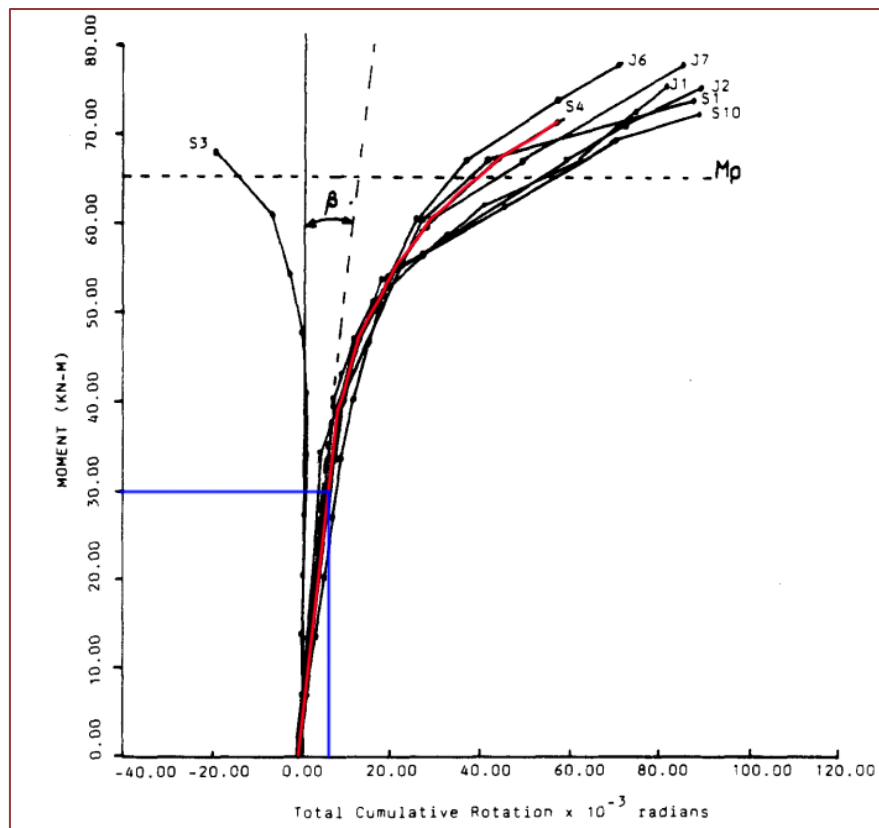


Fonte: Aggarwal & Coates (1986) - Adaptado.

A configuração geométrica adotada foi baseada no modelo S4, que emprega uma chapa de extremidade com espessura de 16 mm, parafusos M20 de alta resistência e uma viga de 800 mm de comprimento. A escolha foi feita com base na combinação equilibrada entre espessura da chapa de topo e comprimento da ligação, fornecendo um comportamento semirrígido representativo e compatível com aplicações usuais em pórticos metálicos. Além disso, a disponibilidade dos dados experimentais associados a esse modelo permitiu a extração confiável da rigidez rotacional inicial, essencial para a modelagem numérica proposta.

Os ensaios experimentais conduzidos pelos autores forneceram curvas momento-rotação detalhadas. A rigidez rotacional inicial da ligação foi determinada a partir da inclinação da fase elástica no gráfico momento-rotação fornecido pelo ensaio experimental, considerando a variação linear entre os primeiros incrementos de carregamento, ou seja, fazendo uma divisão do momento (30 kN·m) pela rotação ($7 \cdot 10^{-3}$ rad). Dessa forma, a rigidez rotacional inicial da ligação, estimada em 4285 kN·m/rad, como pode ser observado no gráfico a seguir:

Figura 4.2 – Curva momento-rotação da ligação metálica com chapa de topo (modelo S4), com destaque para a região elástica utilizada na estimativa da rigidez inicial



Fonte: Aggarwal & Coates (1986) – Adaptado para determinação da rigidez.

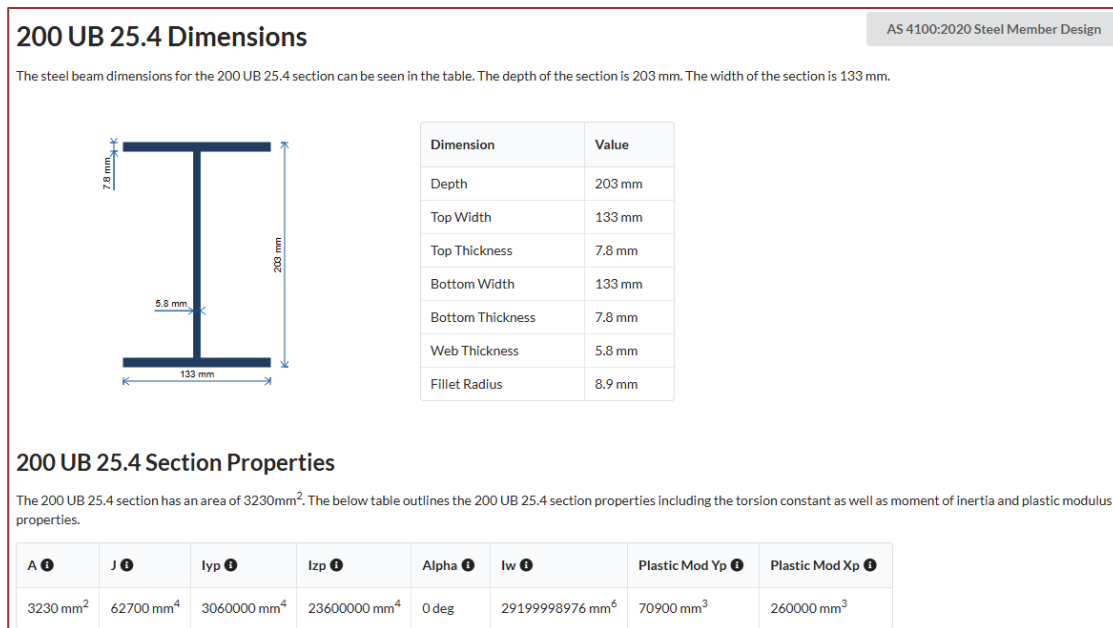
Essa abordagem permite avaliar a influência da rigidez da ligação sobre os deslocamentos horizontais, redistribuição de esforços e estabilidade global do pórtico, com especial atenção aos efeitos de segunda ordem.

5. CÁLCULOS E ANÁLISES

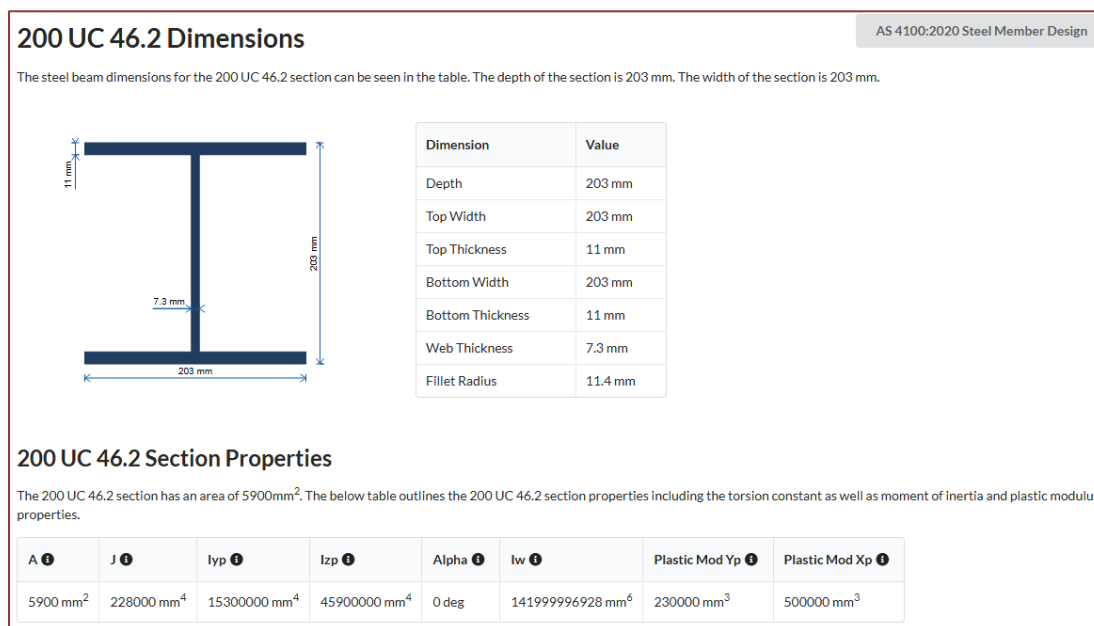
5.1. ESPECIFICAÇÕES DA ESTRUTURA

Para a modelagem estrutural, foram inicialmente coletadas as propriedades geométricas e mecânicas dos perfis metálicos adotados para vigas e pilares, de modo a garantir maior precisão na representação do sistema. Os elementos estruturais foram definidos segundo a convenção australiana: 200 UB 25.4 para as vigas e 200 UC 46.2 para os pilares. As principais dimensões e características desses perfis encontram-se apresentadas nas figuras a seguir:

Figura 5.1.1 – Especificações perfil 200 UB 25.4



Fonte: Beam Dimensions (2025).

Figura 5.1.2 – Especificações perfil 200 UC 46.4

Fonte: Beam Dimensions (2025).

As Figuras 5.1.1 e 5.1.2 apresentam, respectivamente, as propriedades geométricas e seccionais dos perfis metálicos 200 UB 25.4 e 200 UC 46.2, obtidas do catálogo do site Beam Dimensions (2025). A fim de facilitar a compreensão e permitir uma comparação direta entre os elementos adotados no modelo, elaborou-se a Tabela 5.1.3, que sintetiza as dimensões principais e as propriedades seccionais de ambos os perfis. Essa apresentação conjunta possibilita identificar as diferenças geométricas e mecânicas entre as seções, destacando o papel estrutural distinto dos elementos viga (UB) e pilar (UC) na composição do pórtico analisado. Segue uma tabela resumo relacionando os perfis metálicos utilizados às suas principais propriedades:

Tabela 5.1.3 – Principais propriedades dos perfis utilizados no pórtico

Propriedade	200 UB 25.4	200 UC 46.2
Altura (mm)	203	203
Largura da mesa (mm)	133	203
Espessura da mesa (mm)	7,8	11
Espessura da alma (mm)	5,8	7,3
Área da seção (mm ²)	3230	5900
Módulo plástico X _p (cm ³)	260	500
Módulo plástico Y _p (cm ³)	70,9	230
Momento de inércia I _x (cm ⁴)	2360	4590
Momento de inércia I _y (cm ⁴)	3060	1530
Peso por metro (kg/m)	25,4	46,2

Fonte: Autores (2025).

A proposta de pórtico adotada para o modelo em estudo consiste em um edifício de 20 pavimentos tipo e um térreo, totalizando 21 pavimentos. Cada pavimento apresenta pé-direito de 3,0 m, de modo que a altura total da edificação atinge 63,0 m. O pórtico plano

adotado possui três pilares, com dois vãos de 5,0 m, totalizando uma largura de 10,0 m. Essa configuração foi escolhida por representar uma estrutura de maior esbeltez, permitindo analisar com mais clareza os efeitos das cargas atuantes na edificação e as diferenças entre as considerações feitas nas ligações viga-pilar.

O modelo foi submetido às ações verticais e horizontais usuais:

- Cargas permanentes: representadas pelo peso próprio da estrutura e demais elementos construtivos;
- Cargas acidentais: associadas ao uso da edificação;
- Cargas horizontais: representadas pela ação do vento.

O detalhamento dos carregamentos, bem como os valores adotados, será apresentado em seção posterior.

Além disso, as condições de contorno foram consideradas de três formas distintas, a fim de avaliar a influência da modelagem das ligações no comportamento estrutural:

- Engastes perfeitos nas ligações viga-pilar;
- Ligações semirrígidas, em análise linear, sem considerar efeitos de segunda ordem;
- Ligações semirrígidas, em análise não linear, considerando os efeitos de segunda ordem.

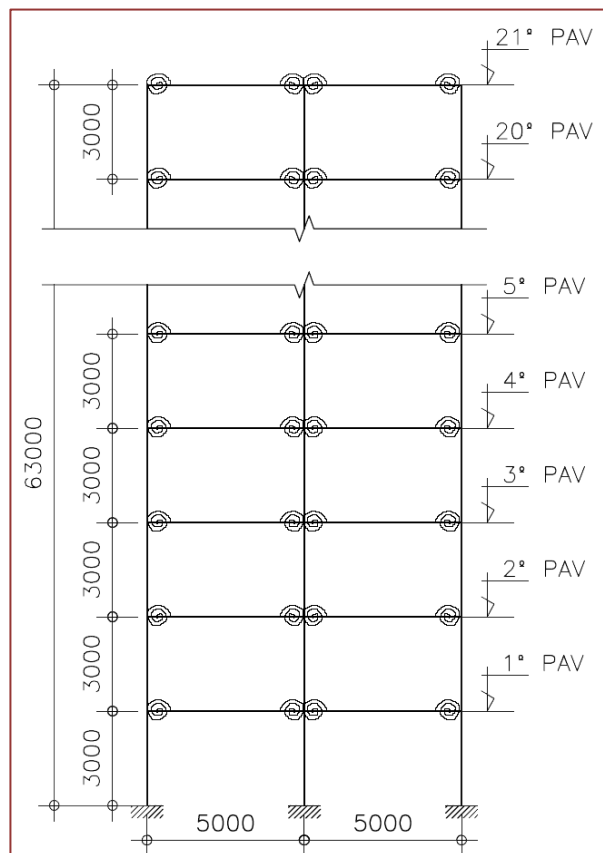
Cabe ressaltar que o modelo foi concebido de forma simplificada, não buscando reproduzir todos os aspectos de um estudo de caso real, mas sim destacar a diferença nos resultados decorrentes da forma como as ligações são representadas no modelo estrutural.

5.2. CARREGAMENTO NO PÓRTICO

Os carregamentos aplicados ao pórtico foram definidos em conformidade com as normas ABNT NBR 6120:2019 (Ações para o cálculo de estruturas de edificações) e ABNT Nbr 6123:1988 (Forças devidas ao vento em edificações).

A Figura 5.2.1 apresenta o esquema de carregamento adotado, no qual constam tanto as ações verticais (cargas permanentes e acidentais) quanto as ações horizontais provenientes da ação do vento.

Figura 5.2.1 – Modelo de pórtico com dimensões, condições de contorno e posicionamento das ligações (medidas em milímetros)



Fonte: Autores (2025).

As seguintes considerações foram adotadas na determinação das cargas:

- Ações horizontais (vento): a distribuição da força do vento foi calculada de acordo com a altura de cada pavimento, conforme prescreve a NBR 6123. Nota-se que a carga de vento no último pavimento apresenta valor reduzido, uma vez que se considerou apenas metade da alvenaria inferior, pela ausência de alvenaria superior;
- Cargas permanentes: o peso próprio da estrutura foi acrescido ao efeito da laje maciça com espessura de 10 cm, considerando ainda a contribuição de camadas de pavimentação, revestimento e forro;
- Cargas acidentais: adotou-se o valor de $1,5 \text{ kN/m}^2$, correspondente a salas de uso em edificações residenciais, conforme a NBR 6120;
- As cargas verticais foram representadas de forma simplificada pelo valor resultante de $7,85 \text{ kN/m}^2$, já incluindo o somatório das contribuições permanentes e acidentais;
- A resultante total foi convertida em cargas lineares aplicadas nas vigas de cada pavimento, de modo a possibilitar a modelagem no software estrutural.

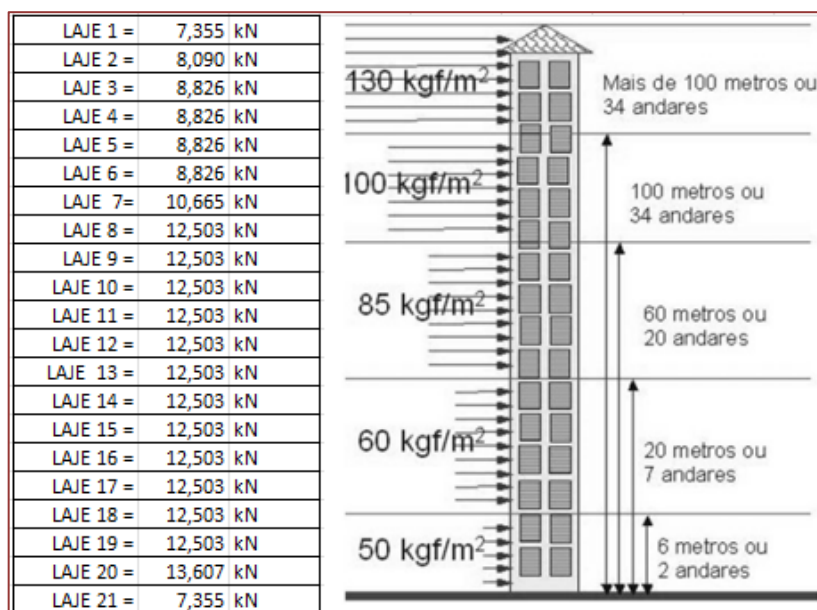
Ressalta-se que os carregamentos foram adotados de forma simplificada, visto que o foco do estudo não reside no dimensionamento detalhado das ações, mas sim na investigação da influência da rigidez da ligação viga-pilar no comportamento global do pórtico. Entretanto, seguem tabelas com valores utilizados baseados nas normas supracitadas:

Tabela 5.2.2 – Carregamentos verticais utilizados no pórtico plano

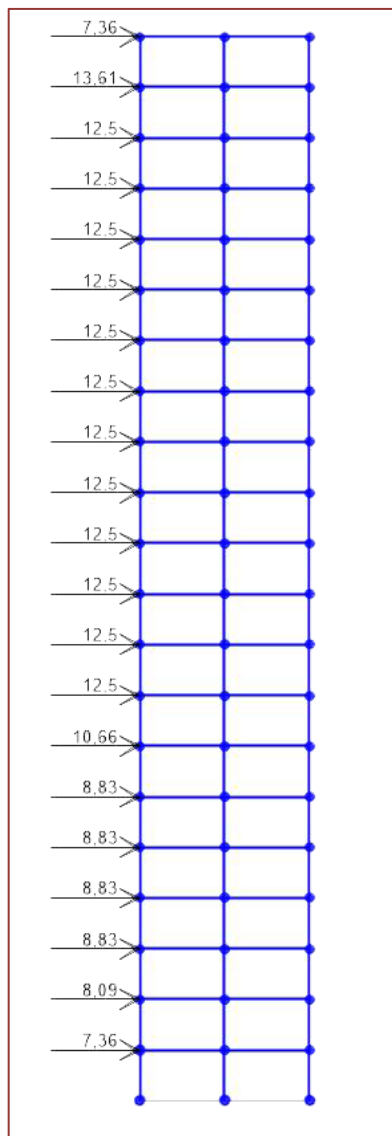
<u>CARGA PERMANENTE</u>		
Peso próprio da laje =	2,5	kN/m ²
Peso da pavimentação e revestimento =	1,5	kN/m ²
Peso do forro =	0,15	kN/m ²
Peso da alvenaria =	2,2	kN/m ²
<u>CARGA ACIDENTAL</u>		
Edificação Residencial (Sala) =	1,5	kN/m ²

Fonte: Autores (2025).

Figura 5.2.3 – Carregamentos horizontais utilizados no pórtico plano



Fonte: Watanabe R. M. (2024).

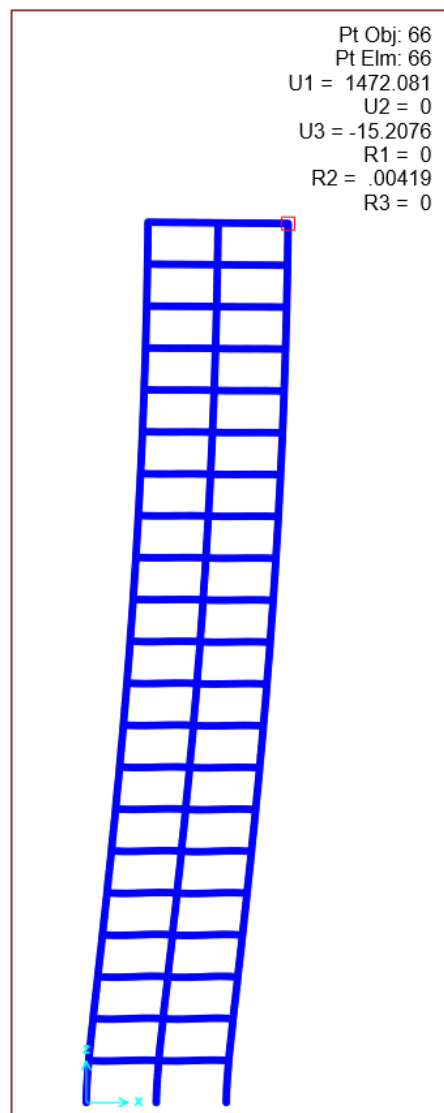
Figura 5.2.4 – Modelo de pórtico com cargas de vento (em kN)

Fonte: Autores (2025).

5.3. ANÁLISE PRELIMINAR E DEFINIÇÃO DE MODELO OBJETO DE ESTUDO

Na análise inicial do pórtico da figura 5.2.4, modelado em software de elementos finitos, observaram-se deslocamentos excessivos, que não correspondiam à ordem de grandeza esperada para uma edificação real. Essa inconsistência foi atribuída às dimensões das seções transversais adotadas no modelo, adotadas iguais ao usados nos modelos experimentais, serem incompatíveis com as dimensões médias de uma edificação.

O estudo experimental utilizado como base utilizou elementos de pequenas dimensões, de modo a viabilizar a instrumentação e os ensaios. Dessa forma, aplicar diretamente os resultados obtidos em uma estrutura com dimensões muito superiores gerou discrepâncias significativas, levando a deslocamentos incompatíveis com a realidade estrutural.

Figura 5.3.1 – Deslocamento no topo da edificação devido ação do vento

Fonte: Autores (2025).

Na Figura 5.3.1, verifica-se que o deslocamento horizontal no topo da edificação ultrapassou 1,5 m, valor claramente inaceitável para um pórtico metálico de múltiplos pavimentos. Essa constatação motivou a necessidade de ajustes nas dimensões do modelo.

Para obter resultados mais representativos, foi realizada uma redução proporcional do pórtico, de modo a manter a coerência entre cargas gravitacionais e ações laterais. Observou-se que, em média, a carga distribuída nos pavimentos tipo correspondia a aproximadamente 120% da força lateral do vento, já considerando a largura tributária do pórtico. Essa relação foi adotada como critério de proporcionalidade das cargas.

Assim, foi definido um novo modelo estrutural para objeto de estudo, com menores dimensões afim de ter resultados mais coerentes. As principais características do novo modelo foram:

- Altura dos pavimentos: 1,0 m por pavimento;
- Número de pavimentos: 9 pavimentos tipo + térreo, totalizando 10 m de altura;
- Largura das salas: distanciamento de 1,55m entre pilares, totalizando 3,10 m de largura entre faces externas.

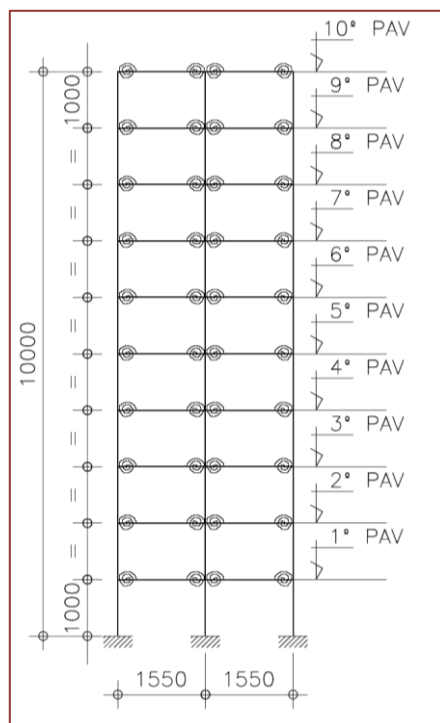
Esse modelo ajustado serviu como objeto de estudo definitivo para as análises posteriores, garantindo maior coerência entre os resultados numéricos e o comportamento estrutural esperado.

Tabela 5.3.2 – Carregamentos horizontais utilizados no pórtico plano

Parâmetro	Modelo Original	Modelo Ajustado
Número de pavimentos	20 + térreo	9 + térreo
Pé-direito	3 m	1 m
Altura total	63 m	10 m
Largura total	10 m (2 vãos)	3,10 m (2 vãos)
Tipo de proporção	Real	Reduzida

Fonte: Autores (2025).

Figura 5.3.3 – Modelo de pórtico com dimensões reduzidas, condições de contorno e posicionamento das ligações (medidas em milímetros)



Fonte: Autores (2025).

5.4. ANÁLISES E RESULTADOS

Com a nova configuração dimensional do pórtico, foi possível realizar diferentes análises em condições distintas de rigidez de ligação e comparar os resultados obtidos, de modo a compreender o impacto direto das hipóteses de modelagem no comportamento estrutural.

É importante ressaltar que, para manter a compatibilidade entre os resultados numéricos e os ensaios experimentais utilizados como base, os esforços aplicados foram ajustados de forma que os momentos fletores máximos não ultrapassassem 30 kN·m. Esse limite garante que a resposta estrutural permaneça dentro da faixa inicial do gráfico momento-rotação, onde a rigidez da ligação pode ser considerada praticamente constante.

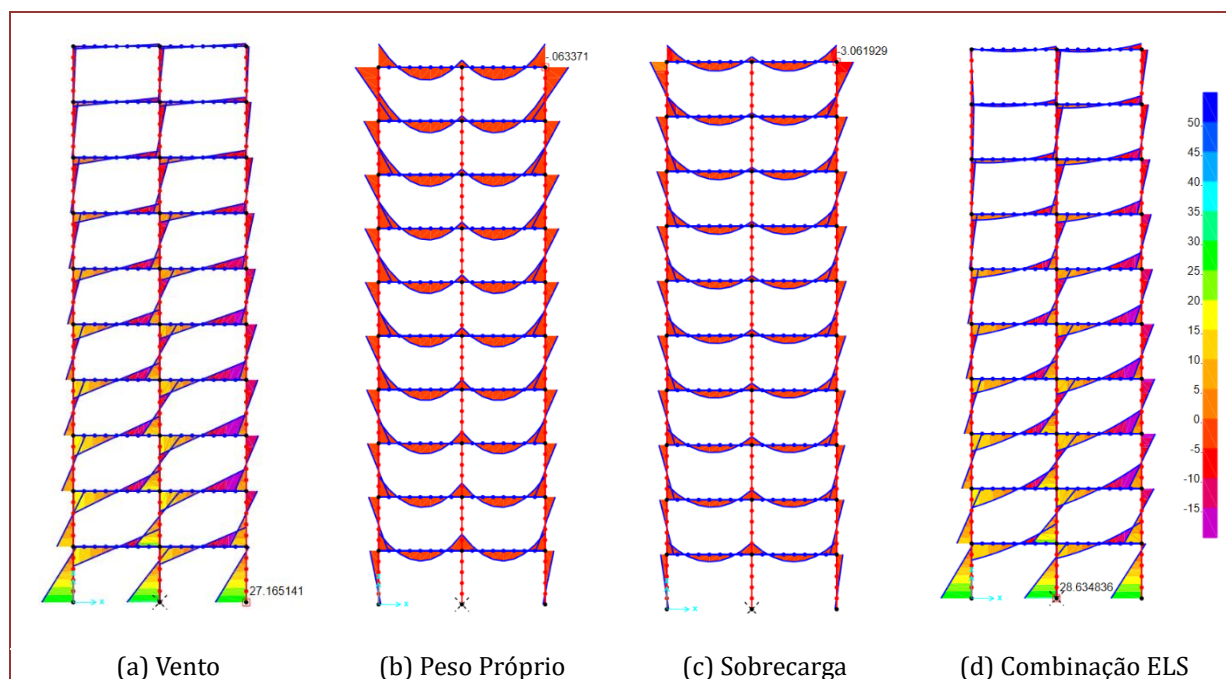
Foram analisadas três situações distintas:

- **Caso 1:** ligações consideradas totalmente rígidas (engastadas);
- **Caso 2:** ligações consideradas semirrígidas, em análise linear;
- **Caso 3:** ligações consideradas semirrígidas, com inclusão dos efeitos de segunda ordem (análise não linear geométrica).

5.4.1. CASO 1 - LIGAÇÕES ENGASTADAS

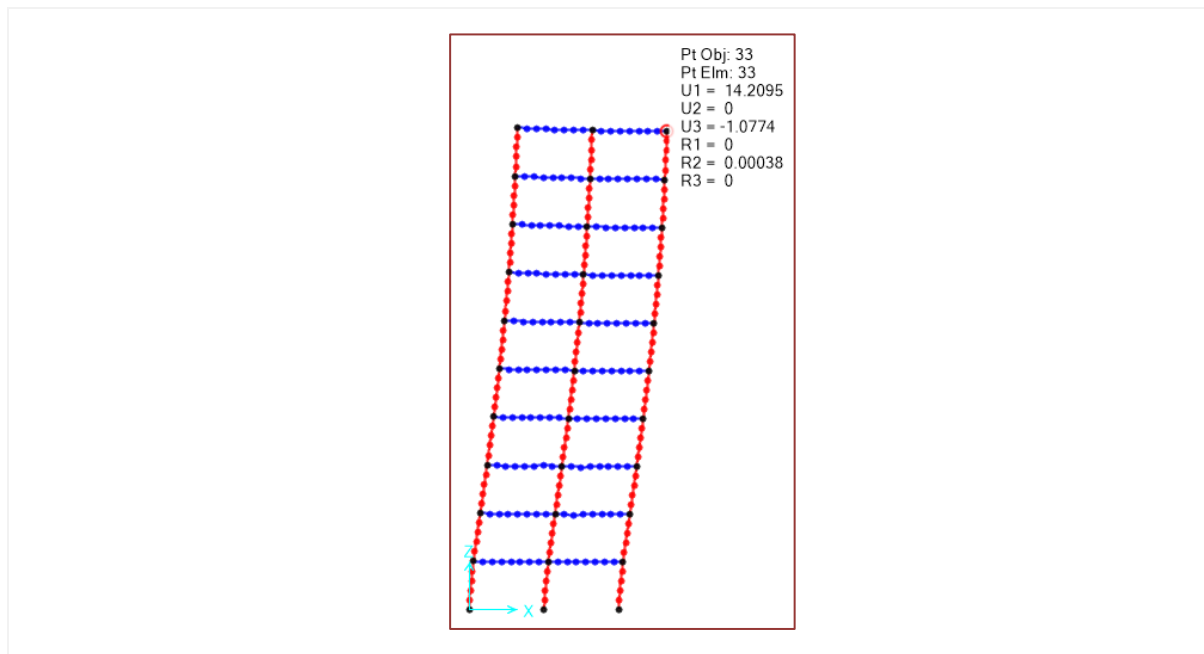
A Figura 5.4.1.1 apresenta os diagramas de momento fletor considerando os carregamentos atuantes (vento, peso próprio e sobrecarga), bem como sua combinação. Já o deslocamento obtido encontra-se na Figura 5.4.1.2.

Figura 5.4.1 – Momento fletor em kN.m do pórtico com ligações engastadas



Fonte: Autores (2025).

Figura 5.4.2 – Deslocamentos em mm do pórtico com dimensões reduzidas sob ação da combinação ELS (ligações engastadas)



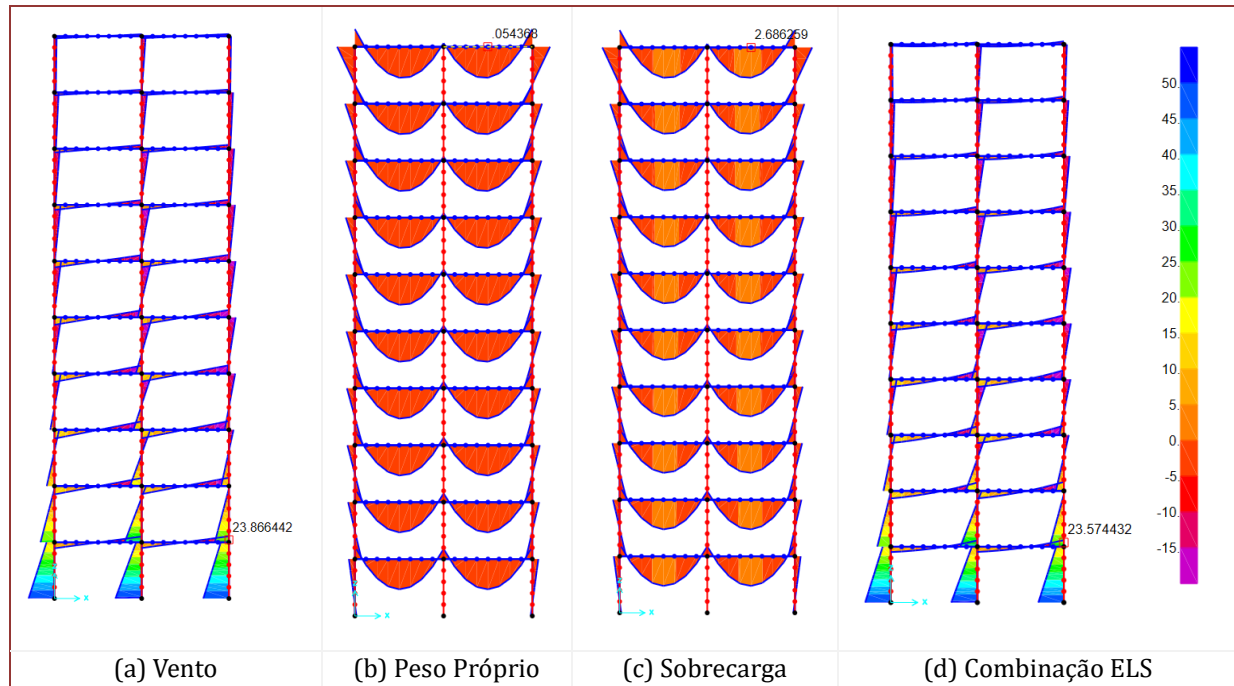
Fonte: Autores (2025).

O deslocamento máximo no topo do pórtico foi de 14,2 milímetros, valor considerado compatível com estruturas de múltiplos andares. De acordo com a NBR 8800:2024, recomenda-se que deslocamentos horizontais não ultrapassem a ordem de grandeza de $L/200$, onde L é a altura total do edifício. Para o modelo em questão (10 m de altura), o limite aproximado seria 50 mm, o que evidencia que o deslocamento obtido se encontra bem abaixo do valor limite.

5.4.2. CASO 2 – LIGAÇÕES SEMIRRÍGIDAS (ANÁLISE LINEAR)

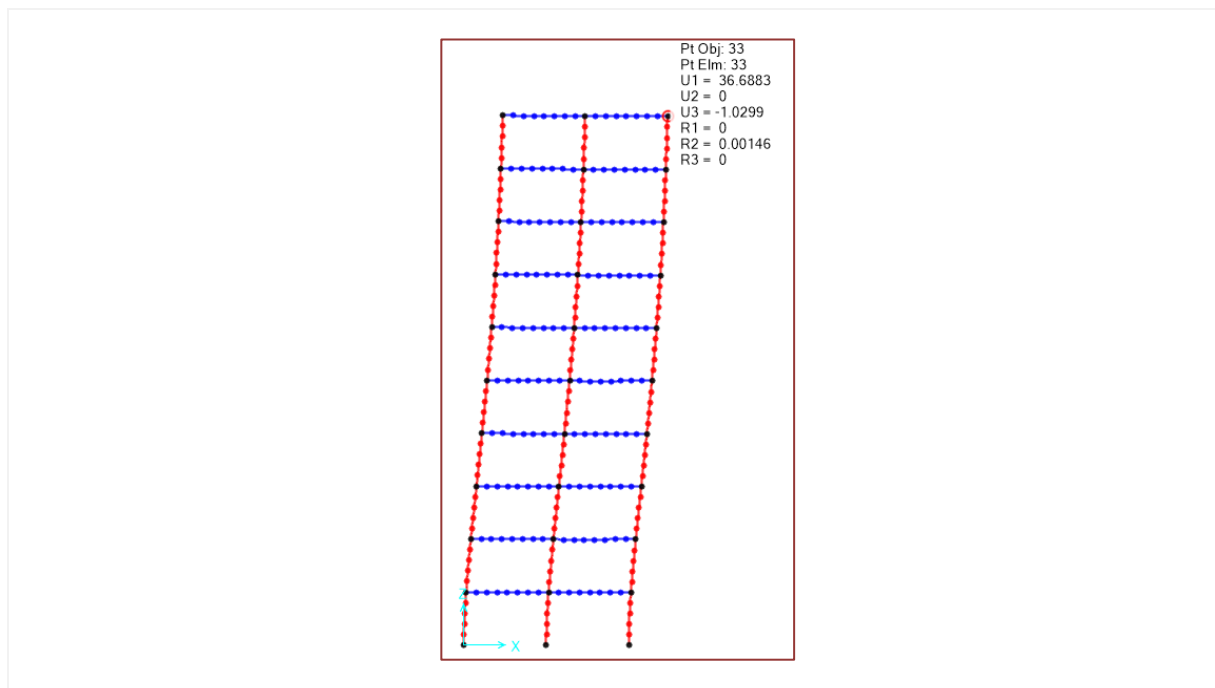
Na segunda análise, a ligação foi modelada com a rigidez rotacional obtida a partir do gráfico momento-rotação experimental supracitada. A Figura 5.4.2.1 apresenta os diagramas de momento fletor, enquanto a Figura 5.4.2.2 mostra os deslocamentos.

Figura 5.4.2.1 – Momento fletor em kN.m do pórtico com ligações semi-rígidas (análise linear)



Fonte: Autores (2025).

Figura 5.4.2.1 – Deslocamento do pórtico em mm com dimensões reduzidas (ligações semi-rígidas)



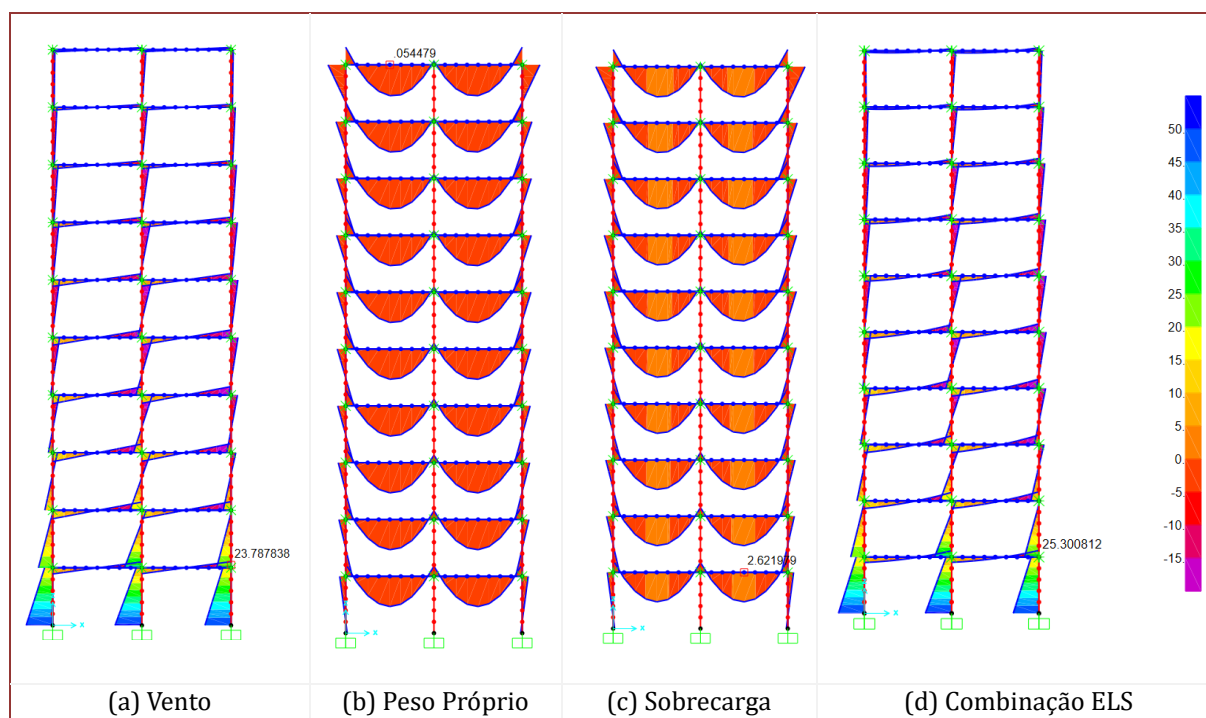
Fonte: Autores (2025).

O deslocamento máximo obtido foi de 36,7 mm, valor aproximadamente 2,6 vezes maior que o do caso engastado. Esse aumento reflete a perda de rigidez global do sistema quando se considera a natureza semirrígida da ligação. Ainda assim, o deslocamento permanece dentro do limite de $L/200$ (50 mm), mantendo-se aceitável segundo critérios normativos.

5.4.3. CASO 3 – LIGAÇÕES SEMIRRÍGIDAS COM EFEITOS DE SEGUNDA ORDEM

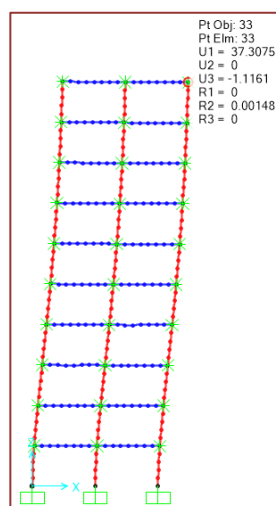
Por fim, realizou-se a análise não linear geométrica, incluindo os efeitos de segunda ordem ($P\Delta$). As Figuras 5.4.3.1 e 5.4.3.2 apresentam os momentos fletores e deslocamentos resultantes, respectivamente.

Figura 5.4.3.1 – Momento fletor do pórtico em kN.m com ligações semi-rígidas (análise não linear)



Fonte: Autores (2025).

Figura 5.4.6 – Deslocamento do pórtico em mm com dimensões reduzidas (ligações semi-rígidas não linear)



Fonte: Autores (2025).

O deslocamento máximo registrado foi de 37,3 mm, valor muito próximo ao obtido na análise linear. A diferença relativamente pequena se deve ao fato de o modelo reduzido não ser excessivamente esbelto. Contudo, em pórticos de maior altura, a consideração desses efeitos tende a ser mais significativa, podendo amplificar deslocamentos e redistribuir esforços de forma relevante.

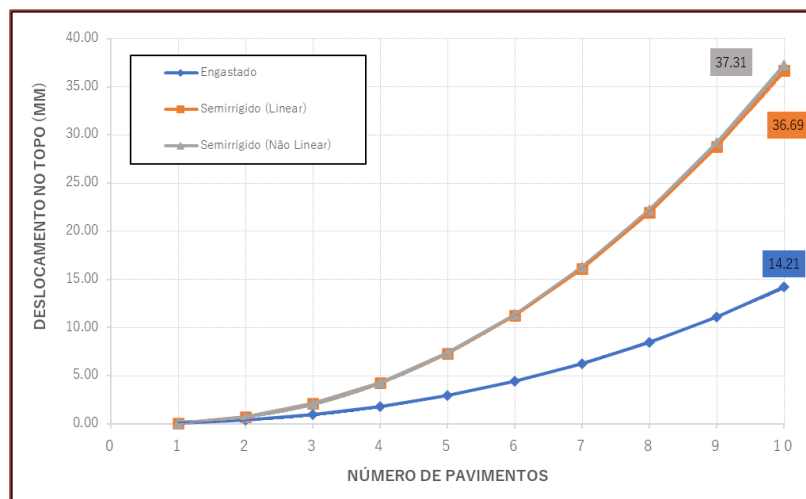
5.4.4. SÍNTESE E DISCUSSÃO GERAL DAS ANÁLISES

Como pode ser observado nas figuras dos três casos, os resultados numéricos dos momentos máximos foram explicitados e uma escala de cores, variando do magenta ao azul-marinho, foi inserida, de modo que as regiões de maior intensidade de esforços sejam rapidamente identificadas em contraste com aquelas de menor solicitação. Ademais, para tornar a análise mais didática, elaborou-se a tabela 5.4.4.1 e o gráfico 5.4.4.2, que sintetizam as principais informações e permite comparar de forma clara os três casos estudados, além de trazer uma comparação entre os deslocamentos horizontais em virtude do número de pavimentos da edificação.

Tabela 5.4.4.1 – Comparação entre as diferentes considerações das ligações viga-pilar

Caso	Tipo de Ligação	Momento Máximo	Deslocamento Máximo	Limite Normativo
1	Engastada	28,63 kN·m	14,2 mm	50 mm
2	Semirrígida (Linear)	23,57 kN·m	36,7 mm	50 mm
3	Semirrígida (Não Linear)	25,30 kN·m	37,3 mm	50 mm

Fonte: Autores (2025).

Gráfico 5.4.4.2 - Deslocamento horizontal do topo da edificação x nº de pavimentos

Fonte: Autores (2025).

A análise comparativa permite observar que:

- A modelagem da ligação atendeu às expectativas iniciais, uma vez que a introdução da semirrígidez reduziu os valores de momento máximo e aumentou os deslocamentos, coerentemente com a expectativa;
- O modelo com ligações engastadas corresponde a uma condição idealizada e superestimada de rigidez, subestimando deslocamentos globais;
- A consideração da semirrígidez produziu deslocamentos mais elevados, aproximando-se da realidade observada em estruturas metálicas;
- Como esperado, o aumento no número de pavimentos na edificação impactou significativamente os resultados dos deslocamentos, inclusive aumentando a discrepância entre os valores;
- A inclusão dos efeitos de segunda ordem, ainda que pouco significativa neste modelo, pode ser relevante em outras edificações com diferentes características geométricas e de carregamento, nos quais tais efeitos podem amplificar os deslocamentos e redistribuir esforços de maneira mais acentuada.

Dessa forma, evidencia-se que a semirrígidez das ligações é um fator determinante para a correta previsão do desempenho estrutural, sendo indispensável sua consideração em análises avançadas que visem segurança, realismo e confiabilidade dos resultados.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

É prática recorrente na engenharia estrutural a adoção de simplificações no tratamento das ligações, seja para reduzir o tempo e os custos com ensaios laboratoriais, seja pela conveniência de empregar conexões cujas propriedades já se encontram documentadas na literatura. Embora tais simplificações sejam úteis no contexto de projetos correntes, elas nem sempre refletem a realidade do comportamento estrutural, podendo comprometer a precisão da análise. Nesse cenário, torna-se essencial a realização de

estudos que questionem a validade dessas aproximações e indiquem os limites de sua aplicação.

Com base nas análises realizadas, verificou-se que a consideração da natureza da rigidez adotada nas ligações exerce influência significativa sobre a resposta global do pórtico. A comparação entre os casos estudados evidencia essa diferença: ao se alterar a modelagem da ligação viga-pilar de engastada para semirrígida, mesmo sem considerar os efeitos de segunda ordem, o deslocamento máximo passou de 14,2 mm para 36,7 mm, representando um aumento de aproximadamente 158%. Embora tais valores ainda estejam dentro do limite normativo ($L/200$), a diferença é suficientemente expressiva para indicar que, em estruturas mais altas e esbeltas, os deslocamentos poderiam facilmente ultrapassar os limites estabelecidos em norma.

Esses resultados destacam a importância de se evitar a generalização excessiva das hipóteses de engaste perfeito ou articulação ideal, já que tais simplificações podem conduzir a erros relevantes de dimensionamento. Ao mesmo tempo, confirmam a necessidade de modelos que incorporem o comportamento semirrígido de maneira realista, sobretudo em análises de segunda ordem, nas quais os efeitos de instabilidade podem ser ampliados.

Cabe ainda ressaltar que o presente estudo possui limitações, tais como:

- Adoção de um modelo em com dimensões reduzida, que, embora adequado para o objetivo proposto, não representa integralmente as condições de uma edificação real de múltiplos andares;
- Simplificações no carregamento, que privilegiaram a análise comparativa em detrimento de um estudo detalhado das ações permanentes e variáveis;
- Dependência de resultados experimentais prévios para a caracterização da rigidez da ligação modelada.

Apesar dessas restrições, a pesquisa cumpre o papel de evidenciar a relevância da semirrigidez e contribuir para a compreensão do seu impacto em pórticos metálicos. Conclui-se, portanto, que a consideração da semirrigidez das ligações é indispensável para análises avançadas em engenharia estrutural, representando um passo fundamental para a conciliação entre realismo, segurança e economia nos projetos de pórticos metálicos.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao professor orientador Leonardo Melo e à Pró-Reitoria de Graduação (PROGRAD) pela concessão da bolsa, pelo apoio ao desenvolvimento deste estudo e pela iniciativa nobre de fomentar a educação no âmbito da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] AGGARWAL, P.; COATES, R. J. **Moment-rotation characteristics of bolted beam-column connections**. *Journal of Constructional Steel Research*, v. 6, n. 3, p. 201-211, 1986. DOI: 10.1016/0143-974X(86)90001-8.
- [2] ARRUDA, Ketellen G. de; HIGAKI, Bruno H. **Influência da rigidez inicial de ligações com chapa de topo ajustada na análise estrutural**. *Anais do 60º Congresso Brasileiro do Concreto – CBC*, Florianópolis, 2018. Disponível em: <https://www.alconpat.org.br>. Acesso em: 5 jul. 2025.

- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6120: Forças Devidas ao Vento em Edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123: Cargas para o Cálculo de Estruturas de Edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.
- [6] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1993-1-8 Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints**. Brussels: CEN, 2005.
- [7] SANTOS, Luciano Barbosa dos. **Influência da rigidez das ligações em estruturas de aço**. 1998. 176 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-06092021-155622>. Acesso em: 7 jul. 2025.
- [8] UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Biblioteca Universitária. **Guia de normalização de trabalhos acadêmicos da Universidade Federal do Ceará**. Fortaleza: Biblioteca Universitária, 2025.
- [9] WATANABE, Roberto. **A ação do vento nas edificações**. Disponível em: <https://www.ebanataw.com.br/roberto/vento/index.php>. Acesso em: 25 set. 2025.

Capítulo 8

Estudo da permeabilidade à água em camada de solo compactado de um aterro sanitário

João Pedro Souza Andrade

Mariana Silva Nascimento

Marília Gabriela Alves de Arruda

Fernanda Lays Oliveira Ribeiro da Silva

Bruna Araújo Candido

Iranilza Costa da Silva

Tallys Celso Mineiro

Wedson Luis dos Reis Dantas

Resumo: O aumento da população mundial com a consequente aceleração do processo de urbanização e evolução tecnológica tem aumentado significativamente a geração de resíduos sólidos urbanos. Para essa geração, é necessário dar destinação ambientalmente adequada. Os aterros sanitários são uma das formas de encaminhamento e depósito de materiais considerados como rejeito. A biodegradação desses resíduos gera subprodutos, como biogases e lixiviado. A fim de impedir a infiltração desse lixiviado para solos e corpos hídricos circundantes, torna-se necessário uma impermeabilização na camada de base da célula do aterro, que garanta que esse líquido não contaminará o meio ambiente externo. Este trabalho tem como objetivo compreender o comportamento de uma camada de base de aterro sanitário por meio da análise de parâmetros geotécnicos. Para tanto, foram utilizados solos da camada de base do Aterro Sanitário localizado no município de Campina Grande (ASCG). Essa camada é constituída pela mistura de solos na proporção 4 (solo natural):1(bentonita). Foram realizados ensaios de compactação, massa específica dos grãos, limites de consistência, análise granulométrica e permeabilidade à água na condição saturada. O solo tem predominância arenosa, com presença de relevante percentual de argila. Os resultados da caracterização geotécnica apontam que o material usado na camada de base do ASCG apresenta potencial para a impermeabilização, segundo a norma brasileira. Analisando critérios internacionais, os ensaios realizados permitem afirmar que as características de impermeabilização podem ser melhoradas por variação de energia de compactação, aumento da umidade da mistura ou por incremento de maiores proporções de bentonita.

Palavras-Chave: Aterro sanitário, Bentonita, Camada de Base.

1. INTRODUÇÃO

O Aterro Sanitário, em meio às diversas técnicas empregadas para o tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), é amplamente utilizada nos países que estão em desenvolvimento, por oferecer facilidade de operação a um custo relativamente baixo, em detrimento a outras formas de tratamento [1].

Uma das atividades básicas atribuídas a um aterro sanitário é a de controlar a migração de contaminantes para o meio ambiente, seja esse líquido ou gasoso, fazendo uso de métodos para impossibilitar que os corpos hídricos, subterrâneos e superficiais, e o solo sejam poluídos.

Camadas de base de solos compactados de aterros sanitários são confeccionadas para impedir a infiltração de contaminantes em camadas adjacentes de solo ou em direção ao lençol freático e rios circundantes. No que se refere a camadas de base de solo compactado para aterros sanitários, em geral, considera-se apenas características de permeabilidade do solo à água [2]. Contudo, considerar apenas este parâmetro não é suficiente para impedir que, em longo prazo, o lixiviado gere algum tipo de contaminação ambiental.

Para tal, torna-se necessário estudar parâmetros de caracterização do solo para compreender seu comportamento. Segundo [1], as propriedades matriciais do solo podem ser explicadas pelo tamanho e forma dos vazios, tamanho das partículas, a quantidade de água retida, entre outras. Por esta razão, torna-se imprescindível a caracterização do solo da camada de base de aterros sanitários. Essa avaliação pode auxiliar no dimensionamento de barreiras, naturais ou artificiais, necessárias para impedir a contaminação do meio externo ao aterro [3].

Deste modo, o objetivo deste trabalho é compreender o comportamento de uma camada de base de aterro sanitário por meio da análise de parâmetros geotécnicos.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.1. RESÍDUOS SÓLIDOS E ATERRO SANITÁRIO

No Brasil, em 1991 veio à tona a legitimação da legislação nacional para disposição de resíduos, tratando, de maneira mais específica, do tratamento, acondicionamento, transporte, coleta e destinação dos resíduos dos serviços de saúde, por meio do Projeto de Lei Nº 203. O Ministério do Meio Ambiente, no ano de 2004, sugeriu diversos grupos de discussões interministeriais com a finalidade de elaborar propostas de regulamentação dos resíduos sólidos. Anteriormente, no final do século XX, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) editou e aprovou a Proposição Nº 259, que estabeleceu Diretrizes Técnicas para a Gestão de Resíduos Sólidos [2].

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) foi instituída no Brasil em 3 de agosto do ano de 2010, com sua publicação no Diário Oficial da União, por meio da Lei Nº 12.305. Além de apontar várias formas de gerenciamento de resíduos, a nova ordem também trazia táticas de gestão integrada. É mencionada na mesma lei a hierarquia de preferências na gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos, que são, conforme [4] e [2]: (i) geração; (ii) redução; (iii) reutilização; (iv) reciclagem; (v) tratamento dos resíduos sólidos; e (vi) disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

O aterro sanitário é, conforme a norma Brasileira NBR 15849 [5], definido como:

uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário.

Nas Figura 1 observa-se o uma representação do aterro sanitário localizado na cidade de Campina Grande – PB.

Figura 1 – Aterro sanitário localizado no distrito de Boa Vista, CG, PB



Fonte:[1].

[6] expõe que as ações antrópicas das mais variadas formas geram algum ripo de rejeito sólido, podendo ser resíduo eletrônico, hospitalar, doméstico, industrial, etc. De modo genérico, os resíduos sólidos urbanos (RSU), são compostos por um percentual de matéria que de maneira relativamente simples pode ser degradada por ações físicas, químicas e biológicas. Subprodutos dos resíduos – os quais requerem um certo controle de modo a atenuar os impactos ambientais – são originados a partir da deterioração dos mesmos, como é o caso do lixiviado e de gases que contém substâncias agressivas ao meio.

Pode-se conceituar o lixiviado ou percolado, ainda segundo [6], como sendo um líquido de alta Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) com odor desagradável e cor negra originada pela decomposição de matéria orgânica em lixões e aterros sanitários. Esse líquido é coletado por drenos no interior das Células do Aterro Sanitário e conduzido para tratamento.

2.1.2. CONTAMINAÇÃO DOS SOLOS

O solo é conceituado como sendo um estrato superior da crosta terrestre, que se localiza entre o substrato rochoso e a superfície, formada por minerais, água, ar, organismos vivos e matéria orgânica, conforme é definido por [7]. Além disso, pode-se dizer que o solo também pode ser definido como um biogeoquímico complexo que possui papéis ecológicos, econômicos, sociais e culturais e que exerce uma importante função para a atividade e para a sobrevivência da humanidade, bem como de todo o meio existente [7].

O Conselho Nacional do Meio Ambiente [8], evidencia que as principais funções do solo são:

- i. servir como meio básico para a sustentação da vida e de habitat para pessoas, animais, plantas e outros organismos vivos;
- ii. manter o ciclo da água e dos nutrientes;
- iii. servir como meio para a produção de alimentos e outros bens primários de consumo;
- iv. agir como filtro natural, tampão e meio de adsorção, degradação e transformação de substâncias químicas e organismos;
- v. proteger as águas superficiais e subterrâneas;
- vi. servir como fonte de informação quanto ao patrimônio natural, histórico e cultural;
- vii. constituir fonte de recursos minerais; e
- viii. servir como meio básico para a ocupação territorial, práticas recreacionais e propiciar outros usos públicos e econômicos.

O acondicionamento de resíduos sólidos ou o uso de pesticidas e fertilizantes podem causar o aumento da concentração de elementos químicos com potencialidades tóxicas, especialmente metais pesados, em solos ou águas subterrâneas [9].

Deve-se mencionar que, com frequência, usa-se as expressões “contaminação” e “poluição” para se referir à mesma situação, porém, eles apresentam significados diferentes [10]. Consoante [11], tem-se “contaminação” como sendo concentrações que se encontram superiores ao nível base admitido para uma determinada área ou organismo, ou seja, a presença de altas concentrações de substâncias na água, sedimentos, solo ou nos organismos vivos. Em contrapartida, à inserção antrópica, de forma direta ou indireta, de substâncias ou energia no meio, que levem a causas prejudiciais aos recursos biológicos e que se apresentem como perigo à saúde, dar-se o nome de “poluição”.

2.1.3. SISTEMA DE PROTEÇÃO

2.1.3.1. CAMADA DE BASE DE ATERRO SANITÁRIO

Segundo [12], a camada de baixa permeabilidade à água, geralmente denominada de Camada de Base, é formada por materiais naturais, artificiais ou a combinação de ambos, protegendo as adjacências da percolação do fluido, sendo essa atividade sua principal função. Em outras palavras, a camada usada para impermeabilizar a base de aterros sanitários precisa certificar que não haja passagem de contaminantes para o meio ambiente [13].

De modo análogo a [12], [14] também coloca que a finalidade maior da camada de base seria atenuar o transporte de contaminantes para a zona não saturada e/ou aquífero subjacente. Esses dispositivos são requeridos em uma variedade de obras como canais, reservatórios, diques, lagoas de rejeito, lagoas de tratamento de resíduos e aterros sanitários [7].

Alguns componentes básicos aos aterros sanitários, são: (i) sistemas de drenagem superficial e interna; (ii) sistemas de monitoramento de líquidos e gases; (iii) impermeabilização inferior e superior (base e cobertura, respectivamente); além de um (iv) eficaz sistema de tratamento dos líquidos lixiviados [13].

As camadas de base mais usadas, conforme [15], são as que fazem uso como barreiras diversos materiais, como: geocomposto bentônico, geossintéticos, resíduos sólidos urbanos, solos argilosos compactados, solo cimento ou uma mistura de diferentes compostos. A existência de outros tipos de camadas de base também é observada, sendo estas formadas por tiras de pneus ou combinação de solos e cal hidratada como forma de barreiras de impermeabilização. Atualmente, tais barreiras ainda se encontram em estado de estudo.

Do ponto de vista do custo-benefício, as camadas de impermeabilização formadas por solos argilosos são as mais vantajosas, segundo [16]. Porém, devido às diferenças entre as propriedades e características que cada solo apresenta, torna-se necessário estudar cada caso de forma prévia.

Camadas compactadas de solo que têm como objetivo impedir o fluxo vertical de lixiviado da massa de resíduo são conhecidas como camadas de base de solo argiloso. São formadas, basicamente, por solo compactado, mas podem ser combinados com distintos materiais como carvão, cinzas, cimento, cal, fibras e bentonita [17], [15]. Possuem, também, a vantagem de apresentar condutividade hidráulica adequada e resistência à influência química do lixiviado [18].

Para a impermeabilização das camadas de fundo da base de aterros sanitários pode ser utilizado alguns materiais, que são apontados por [14] e por [19], tais como:

- camadas de solo compactado (*compacted clay liner* – CCL);
- geossintéticos (geomembrana – GM, ou geocomposto argiloso para barreira impermeável – GCL); 23; e
- combinação das anteriores.

Os principais solos utilizados para esta finalidade são os argilosos, com coeficiente de permeabilidade é da ordem de 10^{-12} cm/s [19].

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. CAMPO EXPERIMENTAL

O município de Campina Grande-PB possui as coordenadas geográficas: Latitude de 7°13'50" S, Longitude de 35°52'52" W, com altitude de 551 m em relação ao nível do mar. Está situada na região do Agreste Paraibano e inserido no Semiárido Brasileiro, apresentando a média de 22,7°C de temperatura, evaporação anual de 1417,4 mm e pluviosidade média anual de 802,7 mm/ano [20]. Apresenta condições próprias das zonas semiáridas e latitudes tropicais. Apresenta uma população estimada de 411.807

habitantes [21], com uma área territorial de 591,658 km², contendo ainda 4 (quatro) distritos, Catolé de Boa Vista, Catolé de Zé Ferreira, São José da Mata e Galante.

O campo experimental desta pesquisa é o ASCG situado na Fazenda Logradouro II, no município de Campina Grande-PB, sob as coordenadas geográficas: Latitude de 7°16'46" S e Longitude de 36°00'45" W – às margens da rodovia PB-138 (km 10) que liga a cidade de Campina Grande ao distrito de Catolé de Boa Vista.

O aterro encontra-se em fase de operação desde o mês de julho de 2015 ocupando uma área total de 80,00 ha, sendo 39,38 ha destinados para construção das células de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Projetado para receber inicialmente 350 toneladas de resíduos por dia, para uma vida útil de 25 anos, recebe hoje cerca de 700 toneladas de resíduos por dia.

Desde o início da operação do ASCG – PB, julho de 2015 até julho de 2019, foram implantadas 4 Células, denominadas de Células 1 (C₁), 2 (C₂), 3 (C₃) e 4 (C₄). Atualmente, o ASCG encontra-se com as seguintes configurações: Células 1, 2, 3 e 4 e as junções entre as Células de resíduos, denominadas, como: junção entre a Célula 1 e a Célula 2 (C₁+2), junção entre a Célula 1 e a Célula 3 (C₁+3), junção entre a Célula 2 e a Célula 4 (C₂+4) e junção entre a Célula 3 e a Célula 4 (C₃+4).

Inicialmente, a configuração das células de resíduos possuía dimensões de 100x100 m, na base, correspondentes a largura e comprimento, respectivamente, e uma altura média de 20m, apresentando 4 taludes com altura de 5m cada um, e uma inclinação de 1:2 (vertical:horizontal). Após a junção das Células, o ASCG constitui-se apenas de uma Célula única com dimensões de base de 210x210 m, e uma altura média de 25 m.

3.2. MATERIAIS

O material de estudo desta pesquisa é a camada de base do ASCG. Essa camada é constituída pela mistura de solo do próprio terreno do aterro (solo natural) com bentonita coletada de uma jazida no município de Boa Vista-PB. Essas camadas de impermeabilização são executadas seguindo uma composição de solos na proporção de 80% de solo natural e 20% de bentonita sódica. Esses solos são dispostos e misturados quando da execução da camada, como visto na Figura 3a. Os drenos para coleta do lixiviado na base são executados em formato de espinha de peixe, como mostrado na Figura 3b.

Figura 3 – Camada de base do AS do município de Catolé de Boa Vista, CG – PB

a) Solo usado para a camada de base



b) Execução da camada de base

Fonte: GGA - UFCG (2018).

Os materiais utilizados foram caracterizados de acordo com ensaios e normas técnicas brasileiras vigentes tendo em vista conhecimento do comportamento geotécnico.

3.3. MÉTODOS

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnia Ambiental (LGA) do Departamento de Engenharia Civil.

Cada material foi coletado individualmente no próprio aterro e colocados em sacos plásticos para posteriormente serem levados ao Laboratório de Geotecnia Ambiental (LGA) da UFCG. Os materiais passaram por processos de destorroamento e quarteamento para a obtenção de amostras representativas para os respectivos ensaios. As amostras foram preparadas para a caracterização geotécnica conforme as recomendações das normas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1- Ensaios geotécnicos e respectivas normas

Ensaio	Metodologia
Preparação de amostras	NBR 6457/2016
Massa específica dos grãos de solo	NBR 6508/2016
Análise granulométrica	NBR 7181/2016
Limite de liquidez	NBR 6459/2016
Limite de plasticidade	NBR 7180/2016
Compactação	NBR 7182/2016
Permeabilidade em permeâmetro de carga variável	NBR 14.545/2000

Fonte: Própria do autor.

Os ensaios relacionados são de fundamental importância para conhecimento das características de cada tipo de solo. Através da análise granulométrica e limites de liquidez e plasticidade é possível classificar esse solo e conhecer o comportamento típico de acordo com a predominância das frações de pedregulho, areia, silte e argila.

A realização de ensaio de compactação permite conhecer características de capacidade de suporte da camada, inclusive com obtenção de parâmetros de massa específica aparente seca máxima e umidade ótima.

O ensaio de permeabilidade em permeâmetro de carga variável foi realizado para obter o coeficiente de permeabilidade médio do solo quando aplicado um gradiente hidráulico em corpo de prova saturado. Esse ensaio foi realizado em aparelho de parede rígida.

Com estes parâmetros, será possível estudar e analisar as características geotécnicas e sua influência no coeficiente de permeabilidade à água na condição saturada.

4. RESULTADOS

4.1. CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

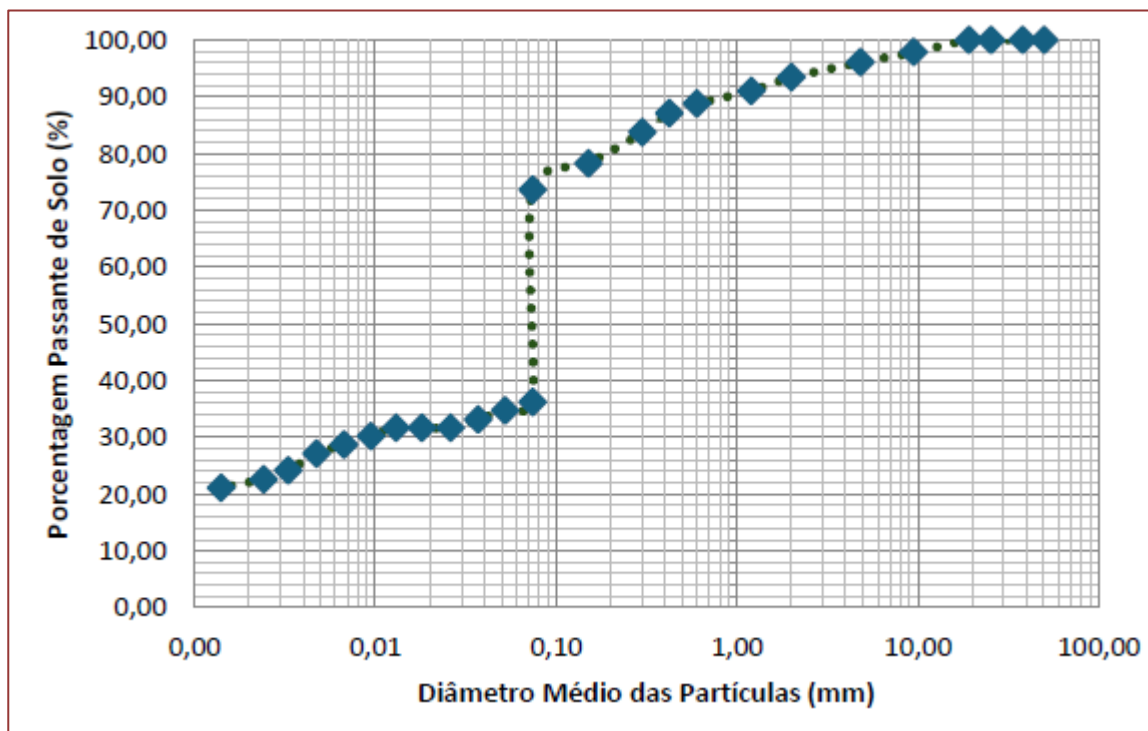
A umidade higroscópica teve um valor de 2,73%, sinalizando um solo seco e com capacidade moderada de retenção de água.

Por meio da análise do ensaio de peso específico dos grãos, determinou-se valor de 26,46 kN/m³, que, segundo [22], o que é indicativo de uma possível presença do mineral feldspato – cuja alterações na maioria das vezes levam à origem de argilas e argilominerais [23] – no solo que forma a camada de base do aterro, pois está compreendido na faixa de 25 kN/m³ - 27,1 kN/m³.

Duas características das argilas de grande importância, pois colaboram em seu uso como material impermeabilizante, são:

- Grande região de superfície com ligações químicas não saturadas, que lhe possibilita a interação com uma diversidade de substâncias [24]; e
- Capacidade de Troca Catiônica (CTC): com facilidade, íons positivos, que ocorram em soluções que entrem em contato com argila – como por exemplo os íons de Cu com valência +1 ou +2 [13] – podem infiltrar entre as suas lamelas e também sair, pois suas ligações químicas são fracas; não chegando a penetrar na estrutura do mineral, apenas prendem-se às superfícies das partículas de argila [24]; esta CTC acaba, por sua vez, ao contribuírem para a imobilização de metais [13].

A curva de distribuição granulométrica é mostrada na Figura 5. Percebe-se que há um sobressalto que se localiza abaixo da dimensão de 0,075 mm (peneira #200), que denota o último ponto da parte do ensaio de peneiramento e o começo da fase de sedimentação do solo – em conformidade ao determinado por [1] para outro tipo de solo –, com concentração de aproximadamente 38% de solo nesta dimensão, o que coopera de maneira significativa para a característica de um solo com graduação não regular, isto é, um solo mal graduado. Essa característica da curva de apresentar um degrau ou salto, é própria de um solo com descontinuidade em sua distribuição granulométrica, ou seja, apresenta predominância de solos granulares com finos preenchendo os vazios, conforme é explicado por [25].

Figura 4 – Curva granulométrica para solo da camada de base

Fonte: Própria do autor (2020).

Observa-se que o percentual de solos grossos é preponderante com relação aos demais, representando aproximadamente 65,31% e que o teor de finos é de aproximadamente 34,69%, conforme ilustrado na Tabela 2. Apesar da predominância de areia, o relevante percentual de argila pode fornecer características de impermeabilização adequadas à camada de solo compactado utilizado na base do aterro sanitário.

Tabela 2 – Porcentagens das frações granulométricas

Ensaio	Tipo de solo	Valor (%)
Granulometria	Pedregulho	3,97
	Areia grossa	7,29
	Areia média	10,5
	Areia fina	43,55
	Silte	6,04
	Argila	28,65

Fonte: Própria do autor.

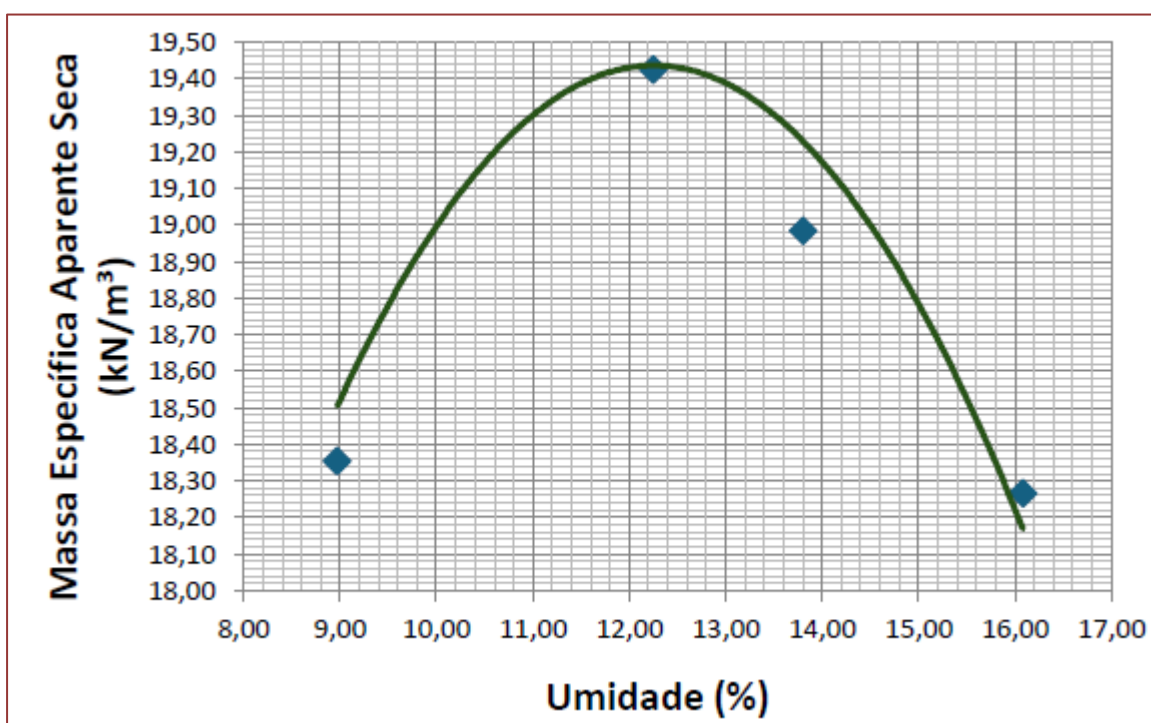
Sabe-se que, para o uso do solo em aterros sanitários, conforme [26], é ideal um percentual de finos compreendido na faixa de 30 – 50%, enquanto que [27] preconiza uma faixa de percentual de finos maior que 30%. Como a percentagem encontrada foi de 34,69%, pode-se concluir que o solo em análise tem potencial para uso em aterros.

A partir da curva granulométrica, pode-se classificar o solo pelo Sistema de Classificação Unificada dos Solos (SUCS) como sendo uma areia argilosa de baixa compressibilidade.

Os Limites de Liquidez (LL) e de Plasticidade (LP) obtidos foram aproximadamente 22% e 19%, respectivamente. Deste modo, pode-se calcular o Índice de Plasticidade (IP) do solo, sendo igual a 3%. O IP encontrado coloca em uma classificação de solo com característica fracamente plástica, pois tem-se $1\% < IP < 7\%$, conforme a classificação de Jenkins, que determina o caráter de plasticidade do solo [28]. O baixo valor do IP sinaliza para um solo com baixa capacidade de retenção de água e de expansão quando exposto à umidade.

Na realização do ensaio de compactação na energia de Proctor Normal do solo utilizado na camada de base do aterro sanitário, obteve-se umidade ótima de 12,2% e peso específico aparente seco máximo de $19,4 \text{ kN/m}^3$, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 5 – Curva de compactação para solo da camada de base



Fonte: Própria do autor.

Segundo [29], os valores de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima não constituem índices físicos do solo e dependem da energia de compactação empregada. Neste valor, obtém-se a maior resistência com a menor permeabilidade. Tudo é justificado pela tendência de maior encaixe das partículas pela aplicação de uma energia adequada, que não permite quebra de grãos ou ausência de acomodação das partículas.

O coeficiente de permeabilidade do solo à água encontrada em laboratório foi de $6,74 \times 10^{-8} \text{ m/s}$, estando de acordo com a [8]. As recomendações de [26] e [27] estabelecem um coeficiente de 10^{-9} m/s , permitindo afirmar que, dentro desses critérios, esta permeabilidade não estaria sendo atendida.

Outros autores como [29] mencionam que os valores ideais de permeabilidade da camada de base para aplicação de solos em aterros são da ordem de 10^{-9} m/s ou mesmo menores.

Tendo em vista que ainda há uma carência de legislações e normas que definam padrões de dimensionamentos de camada de base de aterros sanitários robusta a nível nacional, conforme descrito por [2] e [1], admite-se que as recomendações preconizadas por [8] devem ser admitidas.

Possivelmente, acréscimos de novos teores de bentonita podem melhorar a impermeabilização dessa camada, bem como o uso de uma bentonita com maior capacidade de expansão, que pode fornecer a capacidade de fechamento dos interstícios presentes no solo e consequente redução da permeabilidade.

Pode-se, ainda, testar ensaios de compactação com energias variadas, para permitir melhor encaixa das partículas e consequente redução do coeficiente de permeabilidade, ou ainda, aumento da umidade da mistura.

5. CONCLUSÕES

As características geotécnicas do solo puderam ser determinadas a partir da sua análise, possibilitando verificar, sumariamente, o desempenho do tipo de camada de base do aterro sanitário de Campina Grande, PB. Desta forma, pode-se concluir que:

- Os solos tiveram sua caracterização geotécnica básica completa, sinalizando predominância de solo arenoso, com relevante influência da fração argilosa;
- O solo utilizado na camada de base do aterro sanitário de Campina Grande, PB, apresenta características mínimas exigidas pelas regulamentações nacionais;
- A permeabilidade do solo à água verificada em laboratório encontra-se dentro dos valores de referência indicados pela normativa nacional;
- A aplicação da energia Proctor Normal, no ensaio de compactação, proporcionou condições favoráveis à redução da permeabilidade à água da referida camada.
- Foi possível constatar que os resultados de permeabilidade sinalizam que o solo tem capacidade de impermeabilização, como preconizado por ABNT (1997), porém, não atende a padrões internacionais;
- incremento de solo bentonítico, aumento da umidade da mistura ou a alteração no processo de compactação do solo podem melhorar a capacidade de impermeabilização, garantindo mais segurança para a camada.

REFERÊNCIAS

- [1] FREIRE, P. *Pedagogia do oprimido: reflexões sobre educação*. 60. ed. São Paulo: Paz e Terra, 2022.
- [2] SILVA, J. A. da. *Introdução ao direito ambiental: fundamentos e aplicações*. 5. ed. Rio de Janeiro: Forense, 2020.
- [3] COSTA, M. F. da. *Educação inclusiva: práticas pedagógicas em foco*. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2021.
- [4] FREIRE, P. *Pedagogia do oprimido: reflexões sobre educação*. 60. ed. São Paulo: Paz e Terra, 2022.
- [5] SILVA, J. A. da. *Introdução ao direito ambiental: fundamentos e aplicações*. 5. ed. Rio de Janeiro:

Forense, 2020.

[6] **COSTA, M. F. da.** *Educação inclusiva: práticas pedagógicas em foco*. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2021.

[7] **FREIRE, P.** *Pedagogia do oprimido: reflexões sobre educação*. 60. ed. São Paulo: Paz e Terra, 2022.

[8] **SILVA, J. A. da.** *Introdução ao direito ambiental: fundamentos e aplicações*. 5. ed. Rio de Janeiro: Forense, 2020.

[9] **COSTA, M. F. da.** *Educação inclusiva: práticas pedagógicas em foco*. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016. 8p.

[10] **NBR 6459: Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2016. 5p.

[11] **NBR 6.508: Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 1984.

[12] **NBR 7180: Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016. 3p.

[13] **NBR 7181: Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 2016. 12p.

[14] **NBR 7182: Compactação - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2016. 9p.

[15] **NBR 9604: Abertura de Poço e Trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas**. Rio de Janeiro, 1986c.

[16] **NBR 13896: Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação**. Rio de Janeiro, 1997. 12p.

[17] **NBR 14545: Solo: determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável**. Rio de Janeiro, 2000. 12p.

[18] **NBR 15849: Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento**. Rio de Janeiro, 2010. 24p.

[19] **ARAUJO, P. S.** *Análise do desempenho de um solo compactado utilizado na camada de cobertura de um aterro sanitário*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2017.

[20] **SILVA, T. F. da.** *Estudo de mistura de solos para impermeabilização eficiente de camada de base de aterros sanitários*. 2017. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2017.

[21] **FIRMIANO, A.** *Geoprocessamento para a Solução Fraca do Transporte de Contaminantes Acoplado ao Fluxo de Água Subterrânea*. Tema, São Carlos, v. 18, n. 2, p. 273-286, 2017.

[22] **ZUQUETTE, L. V.** *Geotecnia Ambiental*. 1ª ed. Elsevier. Rio de Janeiro, RJ. 2015. 399 p

[23] **ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15849: Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento**. Rio de Janeiro, 2010.

[24] **ALONSO, T.P.,** *Condutividade Hidráulica de Solos Compactados em Ensaios com Permeâmetro de Parede Flexível*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005, 113 p.

[25] **RIBEIRO, M. A. do C.,** *Contaminação do Solo por Metais Pesados*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, Lisboa, 2013.

[26] **CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA).** Resolução n. 420, de 30 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Diário Oficial da União n. 249. Brasília, 30 de dezembro de 2009, p. 81-84.

[27] **LOPES, C. M.** *Adsorção individual e competitiva de Cd, Cu, Ni e Zn em solos em função da variação*

de pH. 2009. 101 f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

[28] **NASS, D. P.** *O Conceito de Poluição*. Revista Eletrônica de Ciências. Número 13, Novembro de 2002.

[29] **LEITE, A. L.** *A difusão molecular do K⁺ e Clem solos naturais compactados: Uma perspectiva para uso em liners*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos. 144p. 1997.

[30] **SILVA, D. L. M. da.** *Adsorção de metais tóxicos em liners de solo compactado em aterros sanitários*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2018.

[31] **BOSCOV, M. E. G.** *Geotecnia ambiental*. Oficina de Textos, 2008.

[32] **LOCASTRO, J. K.; DE ANGELIS, B. L. D.** *Barreiras de impermeabilização: configurações aplicadas em aterros sanitários*. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental. V20, pag. 200-210, 2016.

[33] **LEME, M. A. G.; MIGUEL, M. G.**; *Estudo geotécnico de uma mistura de solos utilizada em liner de aterros sanitários*, 09/2014, XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, pp.1-10, Goiânia, GO, Brasil, 2014.

[34] **REBELO, K. M. W.** *Resistência de interface entre geomembranas e solos através do ensaio de Ring Shear*. 2003. 216 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

[35] **DANIEL, D. E.** *Geotechnical practice for waste disposal*. Ed. Chapman & Hall. London, 1993.

[36] **SILVA, K. T.** *Projeto de um Aterro Sanitário de Pequeno Porte*. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro/ RJ, 2016.

[37] **AESA – AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA.** *Meteorologia. Monitoramento*. AESA, Fev. 2017.

[38] **IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA.** *IBGE Cidades. População estimada do município de Campina Grande – Paraíba*. IBGE, 2017

[39] **CARVALHO, J. B. Q.** *Fundamentos da mecânica dos solos*. 2. ed. Campina Grande: Editora Marcone, 2004.

[40] **LIRA, H. L.; NEVES, G. A.** *Feldspato: conceitos, estrutura cristalina, propriedades físicas, origem e ocorrências, aplicações, reservas e produção*. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v.8, n.3, p.110-117, 2013.

[41] **BRANCO, M. P. de.** *Minerais argiloso. Serviço Geológico do Brasil (CPRM)*. 18 de agosto de 2014. Disponível em: < <http://www.cprm.gov.br/publique/Redes- Institucionais/Rede-de-Bibliotecas---Rede-Ametista/Minerais-Argilosos-1255.html>>. Acesso em: 09 de março de 2020.

[42] **PINTO, C.S.** *Curso Básico de Mecânica dos Solos*. 3a ed. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2006.

[43] **USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY.** *Technical guidance for RCRA/CERCLA final covers. Office of solid waste and emergency response*. EPA-540-R-04-007. Washington DC.: USEPA, 2004. 421p.

[44] **CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO.** *Resíduos Sólidos Industriais*. 2. ed. São Paulo: CETESB, 1993. 233p.

[45] **CAPUTO, H. P.** *Mecânica dos solos e suas aplicações – Fundamentos*. v.1. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, 1988. 244p.

[46] **ARAUJO, P. S.; SANTOS, J. J. N.; ARAÚJO NETO, C. L.; SOUSA, R. B. A.; PAIVA, W.** *Análise da viabilidade do uso de solo como material impermeabilizante em aterros sanitários*. 123 In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM CIÊNCIAS, 1., 2016, Campina Grande-PB. Anais... Campina Grande: Editora Realize, 2016.

[47] **DANIEL, D. E.** *Geotechnical practice for waste disposal*. Springer Science & Business Media, 2012.

Capítulo 9

O síntese do PET com incorporação de íons de prata a partir dos reagentes obtidos na despolimerização do poliéster

Arthur Alves Gianecchini

Fabio Cezar Ferreira

Joice Erica Motezuki

Resumo: A produção têxtil cresceu com a industrialização, impulsionada pelo consumismo e pela moda, tornando-se um setor altamente poluente. O descarte inadequado de tecidos e a crescente demanda reduziram a vida útil das peças, agravando os impactos ambientais. Este estudo investiga a despolimerização de três tipos de poliéster por hidrólise básica como alternativa sustentável para a reciclagem química. A metodologia envolveu a reação do poliéster com hidróxido de sódio (NaOH) para obtenção do ácido tereftálico (TPA), analisando-se comparativamente os resultados obtidos com a literatura. Em seguida, explorou-se a síntese a partir desse reagente, utilizando nitrato de prata, com o intuito de aprimorar as propriedades térmicas do material reciclado. A análise de FTIR mostra a presença de TPA como principal produto da reação de despolimerização do PET advindo de garrafas pós consumo e também do poliéster têxtil na presença e ausência de elastano em sua composição. Por fim, a técnica de difração de raios X forneceu indícios da presença de prata no material sintetizado, enquanto a microscopia eletrônica de varredura confirmou sua existência na matriz, com análise EDS evidenciando carbono, oxigênio e prata como os principais constituintes.

Palavras-chave: reciclagem química, despolimerização, íons de prata, poliéster.

1. INTRODUÇÃO

A partir da industrialização, houve um significativo aumento na produção têxtil, impulsionado pelo consumismo exacerbado. A moda tornou-se uma indústria lucrativa, mas altamente poluente, pois, para atender às novas necessidades da população, o volume de produção de roupas multiplicou-se, incentivando uma curta vida útil para esses produtos (Toniollo; Zancan; Wüst, 2015; Santos; Lopes, 2019). Como consequência, o vestuário é descartado com alta frequência, e somente recentemente o impacto desse descarte no meio ambiente tem sido amplamente discutido. A produção têxtil consome vastos recursos naturais, como ar, água e solo, gerando danos muitas vezes irreversíveis. Em 2017, foram produzidas cerca de 5,9 bilhões de peças no Brasil (Santos, 2012; Santos; Lopes, 2019), e a destinação desses itens ainda é inadequada, com grande parte sendo depositada em lixões a céu aberto ou aterros sanitários. Segundo o SEBRAE (2023), “no Brasil, são geradas aproximadamente 170 mil toneladas de resíduos têxteis todos os anos e apenas 20% são reciclados”. Os impactos ambientais dessa indústria ocorrem desde o cultivo do algodão, com uso intensivo de agrotóxicos que contaminam solos e rios, até a produção de fibras sintéticas, cuja degradação é extremamente lenta.

Durante as etapas de lavagem e tintura, ocorre o desprendimento de micro plásticos, fragmentos resultantes da degradação fotoquímica de partículas maiores (Sobral; Frias; Martins, 2011; Santos; Lopes, 2019). As fibras têxteis dividem-se em naturais, derivadas da celulose, e sintéticas, compostas por polímeros como náilon, acrílico, polipropileno e poliéster. O desenvolvimento dessas fibras atendeu à necessidade de produção rápida e a baixo custo, aumentando os impactos ambientais (Menegucci, 2015; Santos; Lopes, 2019). As fibras sintéticas derivam do petróleo, um recurso finito, e sua produção emite gases poluentes. No Brasil, 175.000 toneladas de aparas são geradas anualmente, sendo que apenas 20% são recicladas ou reaproveitadas (Barbosa et al., 2016; Santos; Lopes, 2019). O poliéster, devido à sua composição sintética, representa um desafio ambiental considerável, pois sua decomposição no meio ambiente pode levar séculos, contribuindo para a poluição em ecossistemas marinhos e terrestres. Dentro da mesma categoria de materiais, o Polietileno Tereftalato (PET) também enfrenta desafios semelhantes, como contaminação e descarte inadequado, tendo em vista suas aplicações em descartáveis que incluem garrafas plásticas e embalagens. Diante desse cenário, a reciclagem química surge como uma alternativa promissora, especialmente por meio da despolimerização por hidrólise básica, utilizando hidróxido de sódio (NaOH) para recuperar monômeros como o ácido tereftálico (TPA), permitindo sua reutilização na produção de novos materiais. Essa abordagem favorece a economia circular e reduz os impactos ambientais. Conforme mencionado por You et al., (2012), a nanotecnologia é um campo altamente promissor, com nanopartículas produzidas e utilizadas em uma ampla gama de produtos comerciais. As nanopartículas de prata (AgNPs) têm sido amplamente utilizadas em roupas, eletrônicos, biossensores, indústria alimentícia, tintas, protetores solares, cosméticos e dispositivos médicos devido sua perspectiva de liberam íons de prata. Apesar dos avanços, a reciclagem química do poliéster enfrenta desafios na implementação em larga escala. A hidrólise básica, embora eficiente, precisa ser otimizada para garantir viabilidade econômica em termos de tempo, temperatura e concentração de reagentes. Além disso, a crescente demanda por poliésteres em indústrias como a automotiva e de plásticos de engenharia exige soluções inovadoras para aumentar a reciclabilidade e reduzir impactos ambientais. Este estudo tem como objetivo principal investigar a despolimerização de resíduos têxteis de poliéster, visando

à obtenção de TPA por meio da hidrólise básica com NaOH. Além disso, foi explorada a síntese de poliéster reciclado a partir do TPA obtido, incorporando íons de prata com o intuito de melhorar suas propriedades térmicas e antimicrobianas. A caracterização do TPA, incluindo uma análise comparativa entre poliéster têxtil e PET, será realizada utilizando técnicas como FTIR (espectroscopia de infravermelho). Ao contribuir para o desenvolvimento de métodos mais eficientes e sustentáveis de reciclagem, este trabalho busca promover a economia circular e minimizar os impactos ambientais associados aos resíduos de fibras plásticas sintéticas ou embalagens plásticas. A combinação da recuperação de TPA com a incorporação de íons de prata representa um avanço no aproveitamento de materiais reciclados e na transição para um modelo de produção mais sustentável.

2. OBJETIVOS

Realizar a despolimerização de três tipos de poliéster, incluindo poliéster têxtil com elastano, utilizado na confecção de camisetas, poliéster têxtil usada na fabricação de bonês e a garrafa PET. Além disso, tem-se também como objetivo de obter um reagente e sintetizar o poliéster a partir desse monômero, incorporando íons de prata (Ag^+) para modificar as propriedades térmicas do material.

3. JUSTIFICATIVA

A justificativa para o estudo da despolimerização do poliéster está diretamente relacionada aos desafios ambientais e econômicos enfrentados pelo setor têxtil, especialmente devido ao grande volume de resíduos gerados pela produção de tecidos sintéticos, como o poliéster. A indústria têxtil consome grandes quantidades de recursos naturais, como ar, água e solo, resultando em impactos ambientais substanciais. No Brasil, a produção de peças têxteis atinge bilhões anualmente, com uma parcela significativa desses produtos sendo descartada inadequadamente, acumulando-se em lixões e aterros sanitários. Em 2017, foram fabricadas cerca de 5,9 bilhões de peças (Santos, 2012; Santos; Lopes, 2019), e em 2013, o Brasil era o sexto maior produtor têxtil do mundo, com 30 mil empresas, 1,7 milhão de trabalhadores e uma produção anual de 9,8 bilhões de peças (Zonatti et al., 2015; Santos; Lopes, 2019). No entanto, uma grande parte desse volume é descartada de forma insustentável. Segundo o SEBRAE (2023), o Brasil gera cerca de 170 mil toneladas de resíduos têxteis por ano, sendo que apenas 20% desse total é reciclado, o que destaca a necessidade urgente de soluções mais eficazes. A reciclagem química do poliéster surge como uma alternativa promissora para mitigar esses impactos, permitindo a recuperação de monômeros como o ácido tereftálico (TPA), que podem ser reutilizados na fabricação de novos produtos (Romão; Spinacé; De Paoli, 2009). Esse processo não apenas reduz o descarte inadequado, mas também favorece a economia circular, diminuindo a dependência de matérias-primas virgens e mitigando os impactos ambientais da indústria têxtil. Além disso, a funcionalização do poliéster reciclado, por meio da incorporação de íons de prata (Ag^+), pode agregar valor ao material, conferindo-lhe propriedades antimicrobianas e maior resistência térmica. A prata é amplamente reconhecida por sua eficácia contra microrganismos patogênicos, tornando o material mais seguro para aplicações em setores como saúde, moda funcional e embalagens industriais. O espectro antimicrobiano das nanopartículas de prata (AgNPs) é mais amplo que o dos antibióticos comuns, sendo eficaz contra *Escherichia coli* (Gram-negativa) e *Staphylococcus aureus* (Gram-positiva) (Paula et al., 2009; Lee et al.,

2008; YOU et al., 2012). As AgNPs, por meio da liberação de seus íons, inibem o crescimento de microrganismos, incluindo cepas resistentes a tratamentos tradicionais. Membranas de ultrafiltração de polissulfona (PSU) impregnadas com AgNPs mostraram 17 propriedades antimicrobianas contra várias bactérias, como *E. coli* K12 e *Pseudomonas mendocina* KR1, com alta eficácia em baixas concentrações (Zodrow et al., 2009; You et al., 2012). Dessa forma, a reciclagem química do poliéster têxtil, aliada à adição de íons de prata, não só contribui para a gestão sustentável dos resíduos, mas também aprimora a qualidade e a versatilidade do material reciclado, promovendo sua utilização em produtos de maior valor agregado. Esse estudo é relevante não apenas pelo seu potencial ambiental, ao contribuir para a redução da poluição por resíduos têxteis e a conservação de recursos naturais, mas também por abrir novas oportunidades de inovação e valorização de materiais reciclados. A pesquisa sobre a despolimerização do poliéster têxtil e a incorporação de íons de prata, portanto, representa uma abordagem estratégica para promover o desenvolvimento sustentável da indústria têxtil, criando um ciclo de produção mais eficiente e ecologicamente responsável, alinhado aos princípios da economia circular.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1. POLIÉSTER TÊXTEL E PET: DESAFIOS AMBIENTAIS

Em 1930, Carothers sintetizou o primeiro poliéster linear, mas suas limitações de fusão e estabilidade hidrolítica impediram aplicações mais amplas. O avanço decisivo ocorreu em 1946, quando Whinfield e Dickson desenvolveram o poli(tereftalato de etileno) (PET), caracterizado por alta temperatura de fusão (~265 °C) e excelente estabilidade hidrolítica, graças aos anéis aromáticos de sua cadeia principal (Paul; Goodman; Kroschwitz, 1985; Romão et al., 2009).

Desde então, o PET tornou-se um dos termoplásticos mais produzidos no mundo, com aplicações majoritárias em fibras têxteis (67%) e embalagens (24%), além de filmes (5%) e polímeros de engenharia (4%). Sua popularidade decorre do equilíbrio entre propriedades mecânicas e térmicas e o baixo custo de produção (Romão et al., 2009; MacDonald, 2002).

Apesar do amplo consumo, a maior parte dos resíduos têxteis é destinada a aterros ou incineração, gerando perdas significativas. A reciclagem química surge como alternativa promissora para produção de novos têxteis de alto valor, embora dependa de fluxos de materiais mais puros e de processos de separação eficientes (Palme et al., 2017). A complexidade da composição dos tecidos — misturas de fibras, revestimentos, corantes e elementos não têxteis — é o principal entrave para esse avanço (Wang, 2006; Elander; Ljungkvist, 2016).

No setor de plásticos em geral, o crescimento é contínuo, com destaque para o segmento de embalagens, que consome cerca de 30% das resinas. Contudo, a baixa biodegradabilidade do material e o descarte inadequado ampliam os impactos ambientais e os desafios de gestão de resíduos (Mancini; Bezerra; Zanin, 1998; Spiro; Stigliani, 2008; Pinho; Costa; Ramos, 2023).

O PET pode ser reciclado por rotas mecânicas, químicas ou energéticas, com diferentes níveis de eficiência. No Brasil, o mercado de PET reciclado vem crescendo e inclui aplicações em fios, carpetes e até embalagens alimentícias, desde que com tecnologias adequadas de descontaminação (ANVISA, 2008; ABIJET, 2012). Na indústria têxtil, o

poliéster obtido a partir de garrafas PET recicladas destaca-se como opção sustentável, pois consome cerca de 70% menos energias que a produção de fibras virgens. Estima-se que duas garrafas recicladas sejam suficientes para produzir uma camiseta (ABIPET, 2012; Romão; Spinacé; De Paoli, 2009).

O poliéster têxtil consolidou-se pelo baixo custo, durabilidade e facilidade de processamento, reforçando sua ampla adoção em vestuário e tecidos técnicos. Entretanto, o descarte de plásticos tem intensificado problemas ambientais, sobretudo com a dispersão de microplásticos. Esses fragmentos transitam entre diferentes ecossistemas, acumulam contaminantes e metais pesados e afetam tanto organismos aquáticos e terrestres quanto a saúde humana por meio da cadeia alimentar (Rillig et al., 2017; Jiang et al., 2019; Okeke et al., 2022).

4.2. MÉTODOS DE RECICLAGEM

De acordo com Zanin e Mancini (2009), a Sociedade Americana de Ensaios de Materiais (ASTM) normalizou uma divisão dos tipos de reciclagem de plásticos para uniformizar os conceitos. Essa classificação inclui reciclagem primária, secundária, terciária e quaternária, que abordam diferentes métodos de reprocessamento de plásticos com base na origem dos resíduos e nos processos utilizados.

A reciclagem primária envolve resíduos de fontes confiáveis e limpas, como os resíduos gerados pela indústria de plásticos. O processo típico inclui seleção, moagem, lavagem, secagem e reprocessamento utilizando equipamentos como extrusoras e injetoras. No caso de filmes plásticos, pode ser necessário adicionar uma etapa extra de aglutinação para aumentar a densidade dos flocos e melhorar o reprocessamento, resultando em material com propriedades semelhantes às da resina virgem.

A reciclagem secundária utiliza resíduos sólidos urbanos como matéria-prima, e o processo envolve seleção, moagem, lavagem, secagem e reprocessamento, incluindo aglutinação para filmes plásticos. A qualidade do material final é inferior à da resina virgem, devido à possível contaminação e diversidade de tipos de plásticos presentes.

A reciclagem terciária se baseia na despolimerização, um processo químico controlado que decompõe a estrutura polimérica do plástico, resultando em produtos como oligômeros, monômeros e substâncias de baixa massa molar. Estes produtos podem ser reprocessados para novos ciclos de polimerização. A reciclagem quaternária envolve a combustão dos plásticos para gerar energia, com emissão de gases como dióxido de carbono. Embora recupere energia, a reciclagem quaternária destrói o plástico como material utilizável.

Além da divisão da ASTM, Zanin e Mancini (2009) também categorizam a reciclagem de plásticos em processos mecânicos, químicos e energéticos. Na reciclagem mecânica, o plástico é reprocessado sem alterar sua estrutura molecular, enquanto na reciclagem química, ocorre a despolimerização do plástico para recuperar monômeros.

A reciclagem energética é a última opção, pois envolve a queima do material para gerar energia, sem recuperação significativa do plástico em sua forma original.

Zanin e Mancini (2009) sugerem que a reciclagem mecânica deve ser a primeira escolha para garantir a preservação das propriedades do plástico, seguido pela reciclagem química e, por último, a reciclagem energética. Essa hierarquia busca otimizar a reutilização dos materiais, economizando recursos naturais e minimizando os

impactos ambientais.

4.3. POLIMERIZAÇÃO E DESPOLIMERIZAÇÃO DE POLIÉSTERES TERMOPLÁSTICOS

Segundo KLEIN (2009), a polimerização é um processo no qual monômeros reagem para formar macromoléculas de alta massa molecular, sendo influenciada por variáveis como temperatura, pressão, tempo de reação, tipo de catalisador, iniciadores e agitação (Canevarolo, 2002; Klein, 2009). Os polímeros podem ser classificados em polímeros de adição e de condensação. Polímeros de condensação, como os poliésteres, resultam da reação entre grupos funcionais reativos, gerando moléculas de baixa massa molecular como subprodutos, como água ou metanol (Mano, 1985; Klein, 2009).

Os poliésteres termoplásticos, devido à sua versatilidade, são obtidos via reações de policondensação realizadas em duas etapas principais (Klein, 2009). Na primeira, ocorre a reação entre ácidos ou diácidos, como o ácido tereftálico e seus derivados, com excesso de glicol, a temperaturas de 200 a 240°C. Essa etapa gera um pré-polímero de baixa massa molecular, acompanhado de subprodutos como água ou metanol, e pode ser conduzida sob pressão atmosférica ou controlada. Na segunda etapa, conhecida como policondensação, o pré-polímero é aquecido entre 240 e 270°C sob vácuo, com catalisadores específicos, como acetatos metálicos ou trióxido de antimônio, para aumentar sua massa molecular e formar o poliéster termoplástico com cadeias lineares (Canevarolo, 2002; Klein, 2009).

A decomposição química do PET, conhecida como reciclagem terciária, baseia-se na reversibilidade da reação de polimerização (Mancini & Zanin, 2002; Di Souza, Torres & Ruvollo Filho, 2008) e pode ser realizada por processos químicos como hidrólise, glicólise, metanólise e aminólise, catalisados por ácidos, bases ou catalisadores neutros. Na hidrólise em meio alcalino, a ausência de íons hidrogênio para estabilizar a carbonila é compensada pela presença de um reagente nucleófilo mais forte, geralmente o hidróxido (OH^-), em vez da água (Buxbaum, 1968; Di Souza, Torres & Ruvollo Filho, 2008). O cátion da base, mais eficiente que os poucos íons hidrogênio provenientes da ionização da água, conclui a reação.

Diferentemente da hidrólise ácida e neutra, a hidrólise básica não resulta em quantidades iguais de grupos carboxílicos e hidroxílicos. No limite da degradação, pode-se formar um sal de ácido tereftálico. Por esse processo, o PET é despolimerizado em seus monômeros, como o ácido tereftálico (TPA), que, após purificação, pode ser repolimerizado. Essa abordagem não apenas viabiliza a reutilização do TPA em novas aplicações, mas também gera significativos benefícios econômicos e ambientais, reduzindo a dependência de derivados de petróleo e possibilitando economias anuais de até 130 milhões de dólares (Di Souza, Torres & Ruvollo Filho, 2008).

A despolimerização do PET configura-se como uma estratégia sustentável para a recuperação de matérias-primas valiosas, como o ácido tereftálico (TPA) e o etilenoglicol (EG). Esse processo envolve a quebra controlada das cadeias poliméricas por métodos térmicos, químicos ou catalíticos, permitindo a reutilização dos monômeros na síntese de novos polímeros (Di Souza, Torres & Ruvollo Filho, 2008).

O controle rigoroso das condições de reação, como temperatura, pressão e catalisadores, é fundamental tanto na etapa de despolimerização quanto na posterior policondensação dos monômeros recuperados. Essa abordagem possibilita o reaproveitamento de resíduos plásticos, promovendo um ciclo fechado de materiais e

contribuindo para a sustentabilidade na cadeia produtiva (Klein, 2009).

4.4. DEGRADAÇÃO DURANTE PROCESSAMENTO E REPROCESSAMENTO NO ESTADO FUNDIDO

A degradação do poli(tereftalato de etileno) (PET) é um fenômeno complexo e influenciado por uma variedade de fatores, incluindo a presença de co- monômeros e as condições de processamento. Existem dois principais tipos de degradação do PET: a termomecânica e a termo-oxidativa. (Romão et al., 2009).

A degradação termomecânica ocorre durante o processamento do PET, quando o polímero é aquecido e submetido a forças de cisalhamento. Esse processo pode levar à quebra das cadeias poliméricas, resultando na formação de grupos terminais vinílicos e carboxílicos (Khemani, 2000; Romão et al., 2009). A temperatura de processamento normalmente excede a temperatura de fusão do PET, o que pode causar degradações térmicas adicionais, incluindo a eliminação de grupos terminais lábeis, como os hidroxílicos e vinílicos. A formação de compostos de baixa massa molecular, como o acetaldeído, é um resultado comum da degradação termomecânica (Samperi, et al., 2004; Romão et al., 2009).

Durante o processamento no estado fundido do PET, é possível que ocorra a degradação termo-oxidativa, um fenômeno que ocorre na presença de calor e oxigênio. Esse processo pode comprometer as propriedades intrínsecas do polímero, resultando na formação de grupos cromóforos que alteram sua cor, tornando-a amarelada ou marrom. Além disso, a degradação termo-oxidativa pode gerar espécies como quinonas e ésteres insaturados devido à hidroxilação do anel aromático do PET (Ciolacu et al., 2006; Edge et al., 1996; Romão et al., 2009).

As reações secundárias que ocorrem tanto na fabricação quanto durante a degradação do PET podem impactar significativamente a qualidade do polímero. Essas reações podem levar à formação de compostos indesejados, como acetaldeído, oligômeros cíclicos e unidades de dietileno glicol (DEG). Esses subprodutos não só afetam a integridade do PET, mas também dificultam sua reciclagem e reutilização. O acetaldeído é um subproduto gerado durante a síntese do PET em altas temperaturas e, mesmo em pequenas quantidades, pode migrar para alimentos embalados, representando um risco. Além disso, reações de ciclização durante a fabricação do PET formam oligômeros cíclicos, que afetam as propriedades físicas do polímero e complicam o processamento industrial, especialmente na indústria têxtil (Romão et al., 2009).

Esses oligômeros cíclicos também são problemáticos no reprocessamento do PET, pois podem catalisar a degradação térmica do polímero. A formação de oligômeros cíclicos e lineares aumenta com o reprocessamento, impactando negativamente as propriedades mecânicas do PET e sua adequação para certas aplicações (Scheirs, 1998; Romão et al., 2009).

As unidades de dietileno glicol (DEG) são outro subproduto comum da síntese do PET. Sua presença na cadeia do polímero pode alterar suas propriedades físico-químicas, retardar a cristalização e reduzir a cristalinidade do PET no processo de injeção-sopro (Yu et al., 1986; Lecomte; Ligat, 2006; Patkar; Jabarin, 1993; Romão et al., 2009). No entanto, as unidades de DEG também são conhecidas por induzirem a degradação térmica e termo- oxidativa do PET, o que pode prejudicar o processo de reciclagem (Romão et al., 2009; MacDonald, 2002; Hergenrother, 1974; Lecomte; Ligat, 2006).

4.5. COMPOSTOS DE PRATA

A prata, além de ser amplamente valorizada por suas qualidades estéticas e econômicas, possui propriedades químicas e físicas notáveis que a tornam valiosa em diversas áreas, especialmente na medicina e na purificação da água. Com um número atômico de 47 e uma estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC), a prata destaca-se por sua alta condutividade térmica ($430 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$) e baixa resistividade elétrica ($1,63 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$), características que contribuem para suas amplas aplicações tecnológicas e biomédicas (Souza et al., 2023).

Os compostos de prata, como o sulfato de prata e o AgNO_3 , têm demonstrado notável atividade antimicrobiana, desempenhando um papel fundamental no tratamento e prevenção de infecções. Um exemplo relevante de sua aplicação é a sulfadiazina de prata, amplamente utilizada no tratamento de queimaduras, especialmente contra *Pseudomonas aeruginosa*, uma bactéria comumente associada a infecções em feridas queimadas (Franco; Gonçalves, 2008; Souza et al., 2013).

A ação antimicrobiana da prata se deve à sua capacidade de liberar íons prata (Ag^+), que interagem com proteínas celulares, precipitando-as e comprometendo a membrana celular bacteriana, resultando em ação bactericida imediata e bacteriostática residual (Franco; Gonçalves, 2008; Souza et al., 2013). Este mecanismo tem sido amplamente explorado em diferentes contextos, como o tratamento de infecções neonatais, onde soluções aquosas de prata são administradas nos olhos de recém-nascidos para prevenir a conjuntivite (Souza et al., 2013).

Além dos compostos tradicionais de prata, as nanopartículas de prata têm ganhado destaque devido à sua alta reatividade, proporcionada pela grande área superficial. Estas nanopartículas têm mostrado eficácia em uma variedade de aplicações antimicrobianas, incluindo curativos para promover cicatrização de feridas, purificadores de ar e dispositivos médicos, como cateteres e válvulas cardíacas, com revestimentos impregnados com prata para evitar a formação de biofilmes bacterianos (Rodrigues; Ruggiero; Guerra, 2009; Seaton, 2005; Souza et al., 2013). No entanto, o uso crescente de nanopartículas de prata levanta preocupações sobre os riscos potenciais à saúde humana e ao meio ambiente. Devido ao seu tamanho diminuto, essas partículas podem atravessar barreiras biológicas com facilidade, o que pode aumentar sua toxicidade e reatividade, impactando células humanas e organismos ambientais (Paschoalino, 2010; Seaton, 2005; Souza et al., 2013).

Esses compostos têm se mostrado eficazes não só na medicina, mas também em tecnologias ambientais, como a purificação de água, onde a prata atua como um agente antibacteriano essencial (Silver, 2003; Souza et al., 2013). Contudo, o aumento da produção e aplicação de nanopartículas de prata exige um monitoramento contínuo para garantir que seus efeitos sejam benéficos e que não apresentem riscos excessivos à saúde e ao meio ambiente.

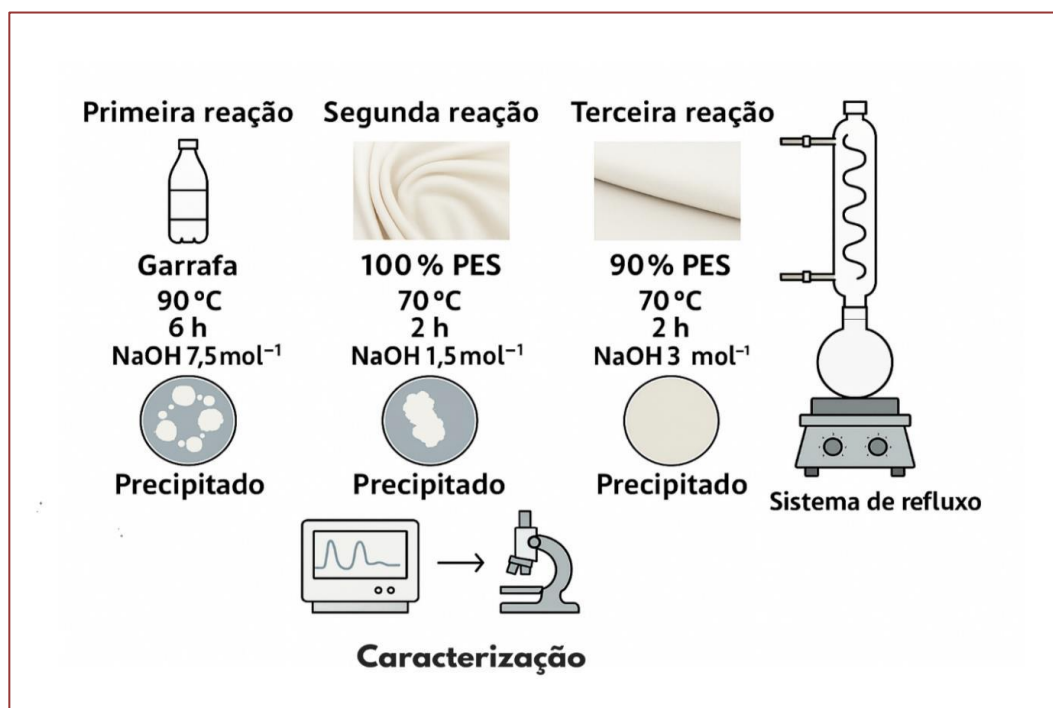
5. METODOLOGIA

Os experimentos deste projeto tiveram início em 2024 com o objetivo de estudar a despolimerização de poliésteres utilizando uma solução aquosa de hidróxido de sódio (NaOH). A primeira reação, foi conduzida com garrafas de poli(tereftalato de etileno) (PET), enquanto, na segunda reação, a matéria-prima utilizada foi retalhos de poliéster têxtil nas composições: 90% de poliéster e 100% poliéster. A pesquisa foi viabilizada

por meio de auxílio financeiro do edital TCC2 da UTFPR – Londrina, o que possibilitou a aquisição de materiais básicos indisponíveis no estoque da universidade. Além disso, empresas parceiras forneceram insumos essenciais para os experimentos realizados. A Plena-Lab disponibilizou vidrarias de maior capacidade, incluindo um balão de fundo chato de 2 litros. A 21 Química forneceu monoetilenoglicol (MEG), reagente fundamental na síntese dos poliésteres. Já a Êxodo Científica forneceu nitrato de prata (AgNO_3), componente escolhido para introduzir íons de prata no meio reacional, visando modificar as propriedades do material. As reações foram conduzidas sob condições controladas de aquecimento e agitação. O material foi submetido a uma solução aquosa de hidróxido de sódio (NaOH) em sistema fechado, utilizando vidrarias específicas para evitar perdas por evaporação. A temperatura e o tempo de reação foram ajustados de forma a maximizar a eficiência na quebra das cadeias poliméricas, com o objetivo de obter monômeros de alta pureza, como o ácido tereftálico (TPA). Para o desenvolvimento das reações, diferentes concentrações de NaOH foram preparadas, ajustadas conforme o tipo de material a ser despolimerizado. Para o PET, utilizou-se uma solução de NaOH a $7,5 \text{ mol.L}^{-1}$. Para o 90% poliéster, a concentração foi de $2,5 \text{ mol.L}^{-1}$, enquanto para o 100% poliéster, utilizou-se uma solução de 5 mol.L^{-1} . Essas variações nas concentrações dos reagentes foram essenciais para otimizar a eficiência do processo, pois diferentes materiais requerem condições específicas para garantir a quebra eficiente das cadeias poliméricas. A metodologia empregada foi baseada em estudos realizados por Di Souza, Torres e Ruvolo Filho (2008), para a reação 1, e por Palme et al. (2017), para as reações 2 e 3, com ajustes feitos conforme as condições laboratoriais disponíveis. Após as reações, os produtos obtidos foram caracterizados com o objetivo de avaliar a eficiência do processo e a qualidade dos monômeros recuperados. Os experimentos foram conduzidos com rigoroso controle de temperatura, tempo de reação e agitação constante, garantindo a homogeneidade do processo. A etapa de neutralização foi seguida pela filtração, permitindo a separação eficaz dos subprodutos. O material foi, então, lavado e seco para garantir a purificação e a remoção da água residual, resultando em monômeros de alta pureza. Esse controle cuidadoso das condições experimentais e a variação na concentração dos reagentes utilizados foram cruciais para o sucesso da despolimerização e para a obtenção dos monômeros desejados.

5.1. REAÇÕES DE DESPOLIMERIZAÇÃO DOS POLIÉSTERES

Figura 1. Representação esquemática do sistema empregado, destacando as variáveis do processo de despolimerização e as etapas subsequentes de caracterização



Fonte: Autoria própria.

5.1.1. PRIMEIRA REAÇÃO DE DESPOLIMERIZAÇÃO (GARRAFA PET)

Na Reação 1, foi utilizada metade de uma garrafa PET pós-consumo, cortada em pedaços pequenos, totalizando 12,25 gramas, que foram colocados em um balão de reação com solução aquosa de NaOH 7,5 mol·L⁻¹ até o completo recobrimento do material. O sistema foi montado com condensador de refluxo para evitar a perda de solvente, sendo a mistura aquecida em banho-maria a 100 °C por 6 horas. Após esse período, o aquecimento foi desligado e a solução deixada em repouso até atingir a temperatura ambiente, originando o meio reacional filtrado. A neutralização foi realizada com ácido sulfúrico diluído a 10%, promovendo a precipitação de um produto de coloração branca. O precipitado obtido foi separado por filtragem e submetido a purificação com água destilada.

Por fim, a lavagem do material assegurou a obtenção de um produto final purificado.

5.1.2. SEGUNDA REAÇÃO DE DESPOLIMERIZAÇÃO (90% POLIÉSTER)

Na Reação 2, foi preparada uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) 1,5 mol·L⁻¹, dissolvendo-se 25 gramas de NaOH em 250 mL de água destilada. Para facilitar a reação, 5 gramas de retalhos de poliéster com elastano foram cortados em pedaços pequenos de aproximadamente 3 mm². O sistema de reação foi montado em um balão de fundo redondo de 500 mL, no qual os pedaços de poliéster foram combinados com a solução

de NaOH 10%. O balão foi posicionado sobre um agitador com sistema de aquecimento em banho-maria, mantendo a temperatura constante em 90 °C. Na parte superior, foi conectado um condensador de refluxo com fluxo contínuo de água de resfriamento, evitando a perda de solvente e estabilizando a temperatura durante os 120 minutos de reação, sob agitação constante. Durante o processo, o meio permaneceu fortemente básico devido ao excesso de NaOH presente. Após o período de aquecimento, a solução foi neutralizada com ácido sulfúrico a 10%, resultando na precipitação dos produtos de reação. Com a neutralização, o meio passou a apresentar características de um ácido fraco. A mistura foi então filtrada a vácuo para separação do precipitado. O produto obtido foi submetido a purificação, conforme o procedimento descrito anteriormente, garantindo a remoção de impurezas e tornando-o adequado para as etapas subsequentes do estudo.

5.1.3. TERCEIRA REAÇÃO DE DESPOLIMERIZAÇÃO (100% POLIÉSTER)

Na Reação 3, foi preparada uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) a $3 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, dissolvendo-se 100 gramas de NaOH em 500 mL de água destilada. O retalho de poliéster 100% foi cortado em pequenos pedaços de aproximadamente 3 mm^2 e pesado, totalizando 31,61 gramas. O sistema de reação foi montado em um balão de fundo chato de 2000 mL, no qual os pedaços de poliéster foram combinados com a solução de NaOH a 20%. O balão foi posicionado sobre um agitador com sistema de aquecimento em banho-maria, mantendo a temperatura constante. Na parte superior, foi conectado um condensador de refluxo com fluxo contínuo de água de resfriamento, assegurando a condensação dos vapores e prevenindo a perda de solvente durante os 120 minutos de reação, conduzidos sob agitação constante. Durante o processo, o meio permaneceu fortemente básico devido ao excesso de NaOH presente. Após esse período, a solução foi deixada em repouso por três dias antes da neutralização com ácido sulfúrico a 10%, o que resultou na precipitação do produto desejado. Em seguida, a mistura foi novamente neutralizada após repouso adicional de três dias, obtendo-se novo precipitado. O material obtido foi então submetido a purificação com água destilada, garantindo a remoção de impurezas. Após filtragem, secagem e etapas sucessivas de purificação, foi obtido o produto final, adequado para continuidade do estudo.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. ANÁLISE POR FTIR DOS PRECIPITADOS

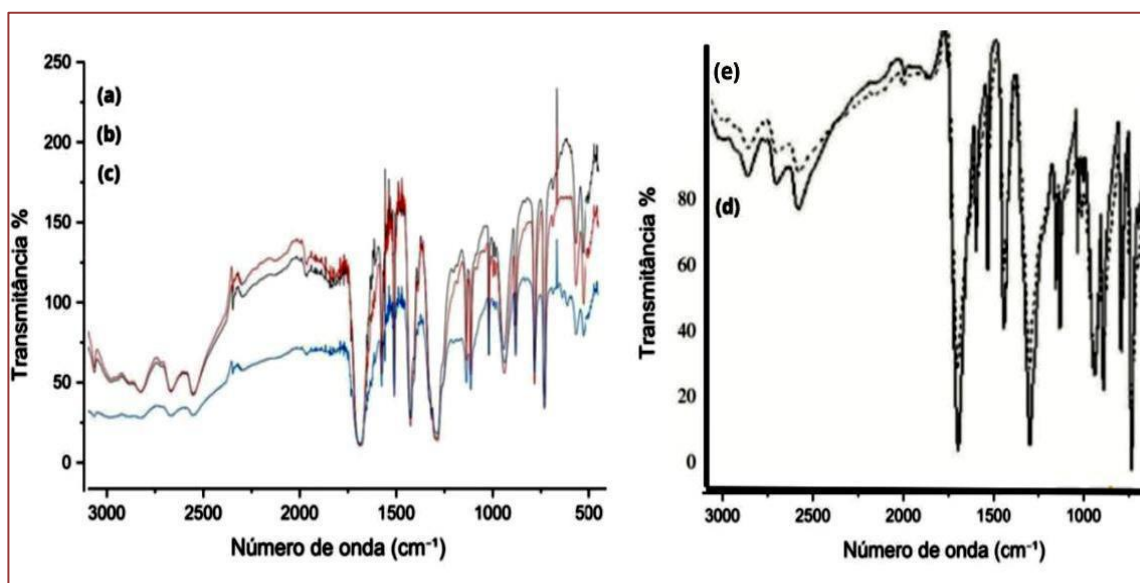
As análises espectroscópicas por FTIR dos precipitados, realizados no equipamento Perkin Elmer modelo Spectrum Two, confirmaram a presença do ácido tereftálico (TPA) como o principal produto da reação. O espectro de infravermelho das amostras de despolimerização, como mostrado na Figura 2, apresenta: (a) garrafa PET, em cor preta; (b) 90% poliéster, em cor vermelha; (c) 100% poliéster, em cor azul; (d) o TPA despolimerizado, representado por linha contínua, obtido com base no espectro descrito por Fonseca, Almeida e Vinhas (2014), apresentando 9 horas de reação, utilizando uma concentração de NaOH de $10,82 \text{ mol/L}$, a uma temperatura de 70°C ; e (e) o TPA comercial fornecido pela Terphane, representado por linha tracejada.

A região entre $3200\text{-}2100 \text{ cm}^{-1}$ apresentou uma banda ampla, atribuída ao estiramento da hidroxila ligada à carbonila do ácido tereftálico, além de possivelmente indicar a presença de água residual. Esse pico está em consonância com

as características esperadas para o TPA, conforme descrito por Fonseca, Almeida e Vinhas (2014). Picos adicionais em torno de 1300 cm^{-1} e 1425 cm^{-1} , associados ao estiramento C–OH e à deformação O–H, também foram identificados. Além disso, os picos em 1574 cm^{-1} e 726 cm^{-1} , relacionados ao estiramento C=C do anel aromático e à deformação do anel 1,4-dissubstituído, foram evidentes nas amostras despolimerizadas (a) garrafa PET, (b) 90% poliéster, e (c) 100% poliéster. Estes picos mostraram grande similaridade com o espectro do (e) TPA comercial fornecido pela Terphane e o espectro (d) descrito no estudo de Fonseca, Almeida e Vinhas (2014), confirmando a formação do TPA nas amostras despolimerizadas.

Ao comparar os espectros obtidos dos experimentos deste TCC, foi possível observar que o espectro A, referente ao precipitado da Reação 1, e o espectro B, produto da Reação 2, apresentaram semelhanças significativas, indicando uma composição química próxima. Ambos mostraram padrões espectrais semelhantes nas regiões de absorção dos grupos funcionais do poliéster, e gerando sobreposições em grande parte do espectro. Em contraste, o espectro C, referente à amostra da Reação 3, apresentou diferenças na transmitância, com picos nos comprimentos de onda muito próximos aos encontrados nos espectros A e B, sugerindo uma estrutura química semelhante, com variações principalmente nas concentrações de grupos funcionais e uma possível presença de impurezas, também indicada na análise visual para esta mesma amostra.

Figura 2- Espectros FTIR das amostras de despolimerização: (a) garrafa PET, (b) 90% poliéster, (c) 100% poliéster, (d) TPA estudo referência (e) TPA comercial



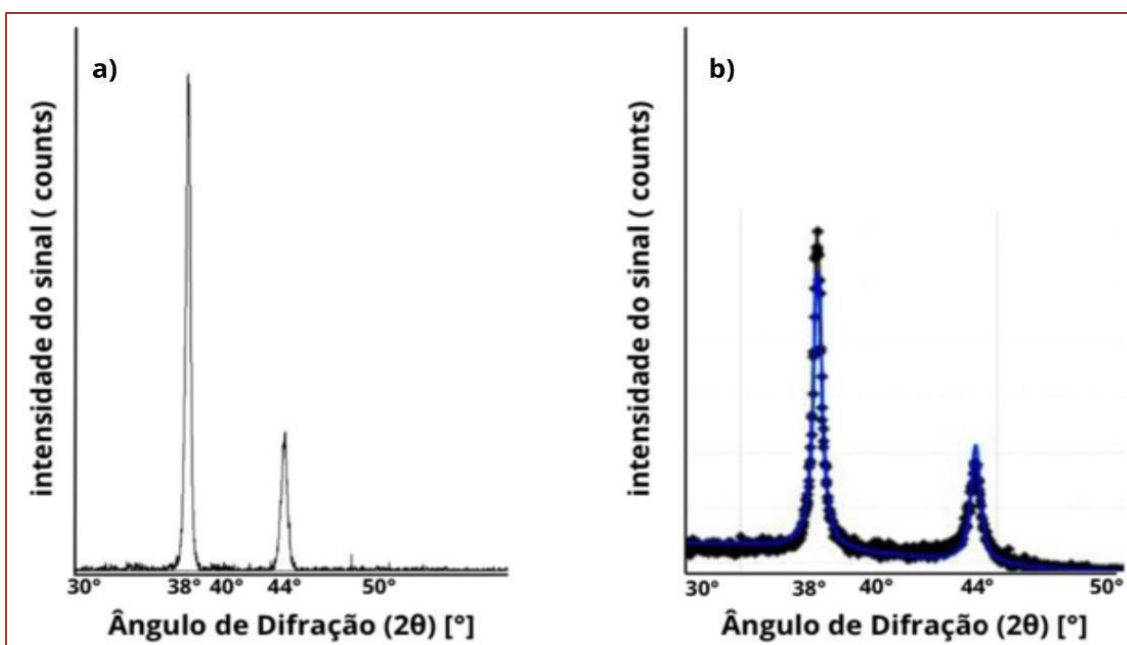
Fonte: Espectros obtidos neste estudo; adaptado de Fonseca, Almeida e Vinhas (2014).

6.2. DIFRAÇÃO DE RAIOS - X (DRX)

O difratograma de raios X, realizado no aparelho D2 Phaser Bruker, do precipitado obtido durante a síntese do PET com a introdução do nitrato de prata está ilustrado na Figura 3 (a). Observam-se picos de difração em aproximadamente 38° e 44° , característicos da presença de prata. Na Figura 3 (b), referente ao estudo de Garcia et al. (2021), é possível identificar picos nos mesmos ângulos, o que permite estabelecer uma

comparação direta entre os dois difratogramas. Essa similaridade sugere a correlação entre o material obtido experimentalmente e o padrão descrito na literatura. Além disso, no difratograma da amostra sintetizada notam-se regiões de maior intensidade, que podem estar relacionadas a contribuições cristalinas oriundas da estrutura do polímero, reforçando o caráter semicristalino da prata.

Figura 3 - Difratograma do precipitado da síntese (a) e referência (b)



Fonte: (a) Autoria própria; adaptado de (b) Garcia et al. (2021).

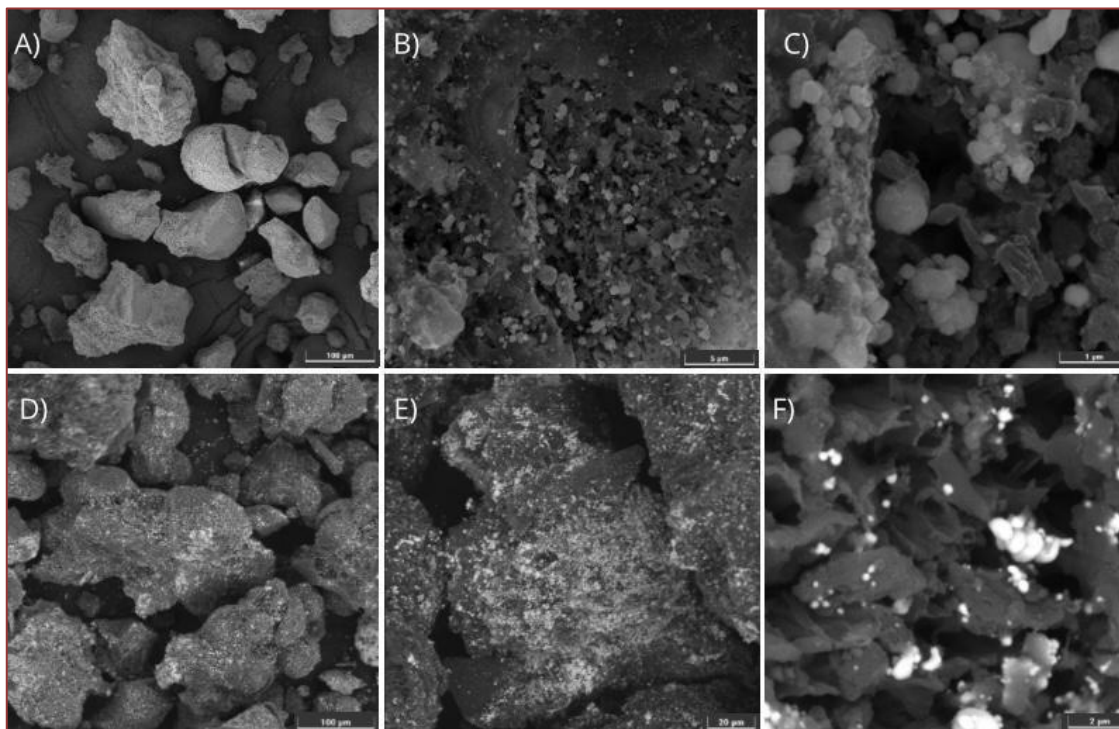
6.3. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

6.3.1. ELÉTRONS SECUNDÁRIOS (SE)

As análises morfológicas dos precipitados foram realizadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), possibilitando a caracterização detalhada da superfície e da distribuição de fases nos materiais obtidos após a despolimerização do PET. A Figura 4 apresenta as micrografias adquiridas em diferentes ampliações. As imagens de elétrons secundários (SE), mostradas em (a), (b) e (c), com ampliações de 100 μm , 5 μm e 1 μm , respectivamente, revelam uma morfologia heterogênea, com grãos de diferentes tamanhos e formas, típica de uma estrutura policristalina pouco definida.

As imagens de elétrons retroespalhados (BSE), apresentadas em (d), (e) e (f), nas ampliações de 100 μm , 20 μm e 2 μm , respectivamente, evidenciam regiões com maior contraste, atribuídas à presença de elementos de maior densidade atômica, compatíveis com partículas metálicas de prata dispersas na matriz. A distribuição não uniforme, dessas regiões indica que a incorporação da prata ocorreu de forma descontínua ao longo do material. Esses achados são corroborados pelos dados de DRX, que identificaram picos correspondentes à estrutura da prata, e pela análise de FTIR, que sugeriu interações entre os íons de prata e os grupos funcionais do ácido tereftálico presentes nos precipitados.

Figura 4- Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do material sintetizado. Imagens adquiridas nos modos SE e BSE



Fonte: Autoria própria.

6.3.2. ESPECTROSCOPIA POR ENERGIA DISPERSIVA (EDS)

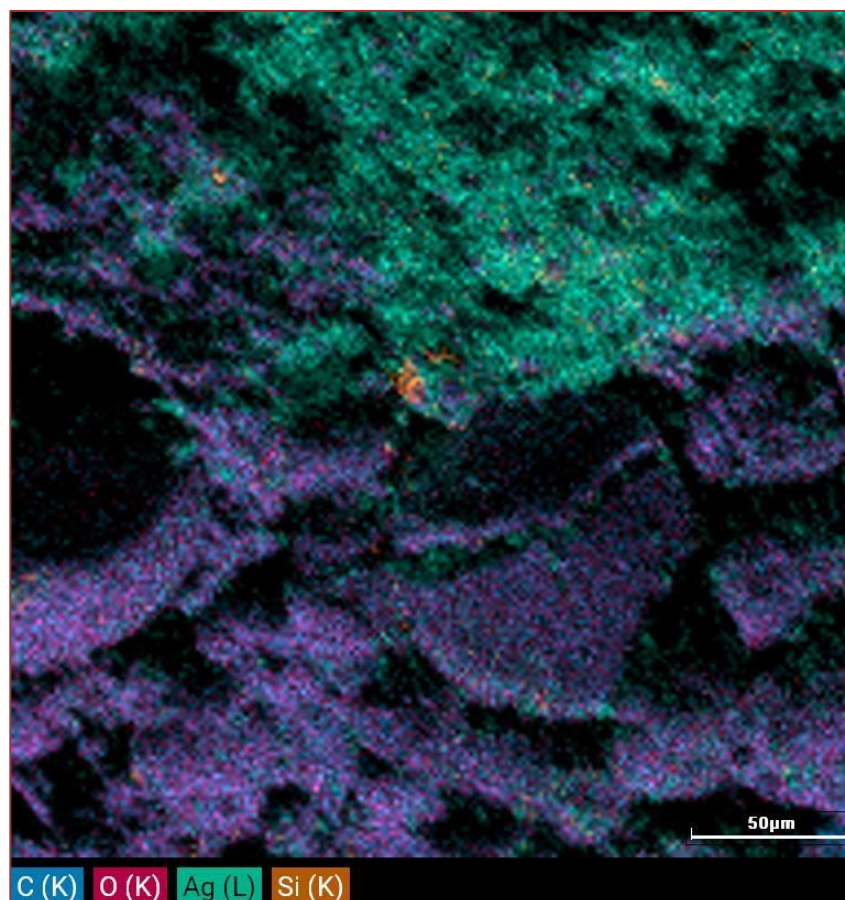
A espectroscopia por dispersão de energia de raios X (EDS) foi realizada em três regiões distintas da porta amostra preparado para análise, permitindo a verificação dos elementos contidos na superfície do material resultante da síntese em diferentes localizações, entendendo melhor a prata e como ela foi dispersa na matriz de carbono e oxigênio, além de informações do percentual de massa contidos em cada região.

6.3.2.1. ANÁLISE DA REGIÃO 1

A análise por EDS na **Região 1** conforme ilustrada na Figura 5, revelou uma quantidade moderada de precipitado, com os grãos distribuídos ao longo da superfície, em uma escala de 50 μm .

A presença de carbono foi significativa em relação aos demais elementos o que era esperado após a síntese. A prata, quando observada isoladamente, apresentou distribuição homogênea na superfície, indicando boa dispersão. O oxigênio também foi detectado, sugerindo uma possível oxidação superficial ou a formação de grupos funcionais.

Os dados da Tabela 1 mostram os percentuais atômicos e as massas para carbono, oxigênio, prata e silício, com destaque para a predominância de carbono e o surgimento da sílica na qual acreditamos estar presente na substância de nitrato de prata ou no próprio poliéster utilizado na despolimerização.

Figura 5- Topografia da região 1

Fonte: Autoria própria.

Tabela 1- Percentuais atômicos e mássicos da região 1

Elemento	Percentual Atômico (%)	Percentual Massa (%)
Carbono (C)	63,40%	41,02%
Oxigênio (O)	30,37%	26,17%
Prata (Ag)	5,44%	31,62%
Silício (Si)	0,79%	1,19%

Fonte: Autoria própria.

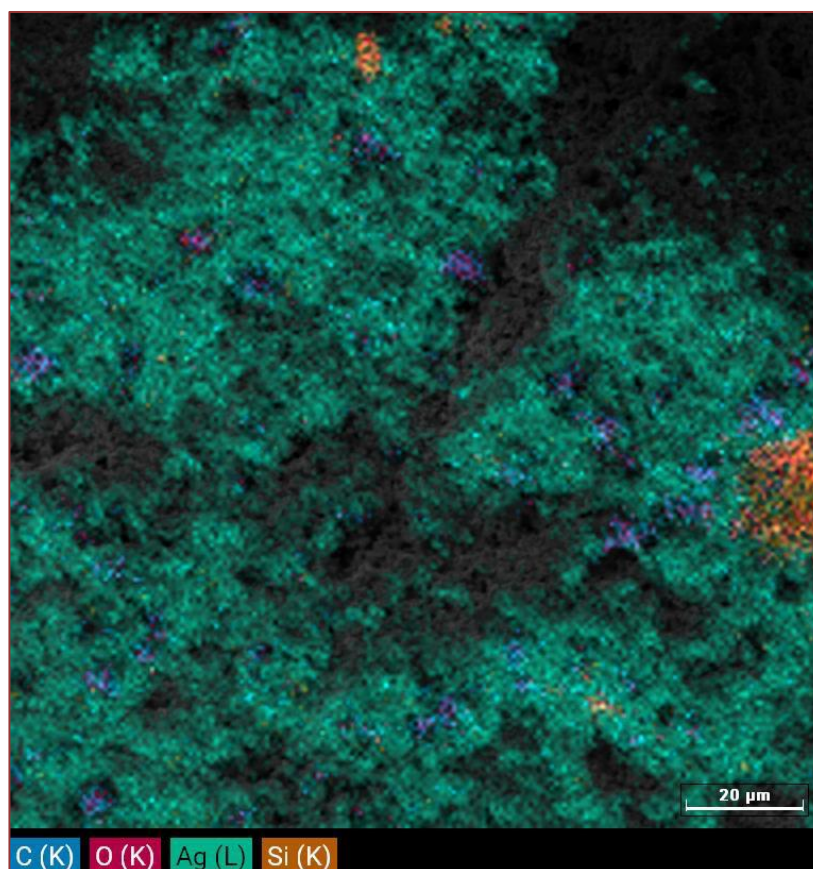
6.3.2.2. ANÁLISE DA REGIÃO 2

Na **Região 2** (Figura 6), a análise foi realizada em uma escala de 20 μm, revelando uma maior quantidade de grãos do precipitado, com uma concentração de prata bem distribuída pela superfície.

A localização desta região, mais afastada permitiu uma análise mais precisa. A prata se destacou em maior quantidade, com distribuição homogênea em relação aos outros elementos.

Os dados de percentual atômico e de massa apresentados na Tabela 2 indicam um aumento na quantidade de prata e uma redução tanto na presença de carbono quanto no oxigênio

Figura 6- Topografia da região 2



Fonte: Autoria própria.

Tabela 2- Percentuais atômicos e mássicos da região 2

Elemento	Percentual Atômico (%)	Percentual em Massa (%)
Carbono (C)	45,79%	14,27%
Oxigênio (O)	25,77%	10,70%
Prata (Ag)	26,24%	73,43%
Silício (Si)	2,20%	1,61%

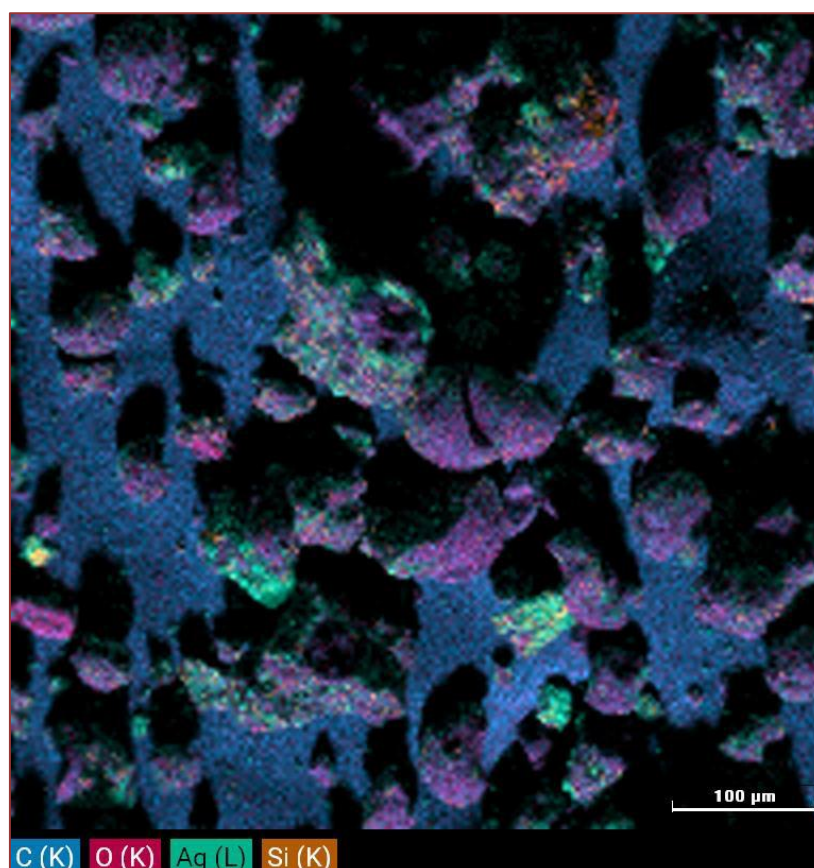
Fonte: Autoria própria.

6.3.2.3. ANÁLISE DA REGIÃO 3

A análise da **Região 3** (Figura 7), realizada em 100 µm, revelou a menor quantidade de precipitado entre as regiões avaliadas. Apesar disso, a presença de prata ainda foi detectada, embora em menor intensidade.

Observou-se um aumento na concentração de carbono em comparação com a Região 1, enquanto os níveis de oxigênio permaneceram semelhantes. Os dados dos percentuais (Tabela 3) confirmam essa tendência, indicando a redução da prata e a variação na distribuição dos elementos na superfície.

Figura 7- Topografia da região 3



Fonte: Autoria própria.

Tabela 3- Percentuais atômicos e mássicos da região 3

Elemento	Percentual Atômico (%)	Percentual em Massa (%)
Carbono (C)	73,56%	59,53%
Oxigênio (O)	24,23%	26,12%
Prata (Ag)	1,89%	13,73%
Silício (Si)	0,33%	0,62%

Fonte: Autoria própria.

7. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos confirmam a eficácia da hidrólise alcalina na despolimerização do PET e do poliéster têxtil, evidenciada pela formação do ácido tereftálico (TPA) como

principal produto da reação.

As análises espectroscópicas por FTIR confirmaram, de forma consistente, a formação do ácido tereftálico (TPA) como principal produto das despolimerizações. A presença das bandas características do TPA, como a forte absorção em 1300 cm^{-1} e 1425 cm^{-1} , relacionadas ao estiramento C–OH e à deformação O–H, a banda em 1574 cm^{-1} , associada ao estiramento C=C do anel aromático, e a região ampla entre $3200\text{--}2100\text{ cm}^{-1}$, atribuída ao estiramento da hidroxila ligada à carbonila, demonstrando grande similaridade com o espectro do TPA comercial fornecido pela Terphane e com o despolimerizado por Fonseca, Almeida e Vinhas (2014).

A semelhança espectral entre os produtos das Reações 1 e 2 sugerem uma composição química próxima, enquanto a Reação 3 apresentou variações atribuídas à presença de aditivos ou impurezas na amostra 100% poliéster.

A purificação do material resultou em uma redução da intensidade das bandas associadas a contaminantes, indicando a remoção parcial de impurezas.

Esses achados reforçam a viabilidade do processo para a recuperação de monômeros a partir de resíduos poliésteres, possibilitando sua reutilização na síntese de novos materiais e contribuindo para a circularidade na indústria têxtil e de embalagens.

As análises de difração de raios X (DRX) indicaram a presença de prata no material sintetizado, fornecendo evidências adicionais sobre a presença da prata na matriz. A microscopia eletrônica de varredura (MEV), acompanhada de análise EDS, confirmou a interação da prata na estrutura do precipitado.

REFERÊNCIAS

- [1] ABIPET – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PET. **Portal ABIPET**. Disponível em: <http://www.abipet.org.br/>. Acesso em: jan. 2025.
- [2] ANVISA – AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Resolução RDC nº20, de 26 de março de 2008**. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, 2008.
- [3] BARBOSA, P. P.; SANTOS, V. C.; MORAES, K. K.; LONGO, M. T.; RODRIGUES, G. J. **Análise do Impacto Ambiental de Fibras Têxteis Naturais, Sintéticas e Artificiais**. *ENEGEP - Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, v. I, p. 1-12, 2016.
- [4] BUXBAUM, L. H. **Angew. Chem. Int. Ed.**, 7 (3), p.182, 1968.
- [5] CANEVAROLO, S. V. **Ciência dos Polímeros**. São Paulo: Artliber, 2002.
- [6] CIOLACU, F. C. L.; CHOUDHURY, N. R.; DUTTA, N.; VOELCKER, N. H. **Macromolecules**, v. 39, p. 7872, 2006.
- [7] DI SOUZA, L.; TORRES, M. C. M.; RUVOLLO FILHO, A. C. **Despolimerização do poli(tereftalato de etileno) - PET: efeitos de tensoativos e excesso de solução alcalina**. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 18, n. 4, p. 334-340, 2008.
- [8] EDGE, M.; WILES, R.; ALLEN, N. S.; McDONALD, W. A.; MORTLOCK, S. V. **Polymer Degradation and Stability**, v. 53, p. 141, 1996.
- [9] ELANDER, M.; LJUNGKVIST, H. **Critical aspects in design for fiber-to-fiber recycling of textiles**. *Mistra Future Fashion*, 2016. Disponível em: <http://mistrafuturefashion.com/2016-1-critical-aspects/>.
- [10] FRANCO, D.; GONÇALVES, L. F. **Feridas cutâneas: a escolha do curativo adequado**. *Revista do Colégio Brasileiro de Cirurgias*, v. 35, p. 203–206, 2008.
- [11] HERGENROTHER, W. L. **J. Polym. Sci.: Polym. Chem. Ed.**, v. 12, p. 875, 1974.
- [12] JIANG, Y. et al. **Effects of microplastics on aquatic fauna and flora**. *Resources, Conservation and*

Recycling, 2019.

- [13] KHEMANI, K. C. **Polymeric Degradation and Stability**, v. 67, p. 91, 2000.
- [14] KLEIN, G. **Poliésteres termoplásticos: processos de polimerização e aplicações industriais**. São Paulo: Ed. Química Verde, 2009.
- [15] LECOMTE, H. A.; LIGGAT, J. J. **Polymer Degradation and Stability**, v. 91, p. 681, 2006.
- [16] LEE, B. U.; YUN, S. H.; JI, J. H.; BAE, G. N. **Inactivation of *S. epidermidis*, *B. subtilis*, and *E. coli* bacteria bioaerosols deposited on a filter utilizing airborne silver nanoparticles**. *J. Microbiol. Biotechnol.*, v. 18, p. 176–182, 2008.
- [17] MACDONALD, W. A. **Polymer International**, v. 51, p. 923, 2002.
- [18] MANCINI, E.; ZANIN, H. **Processos de hidrólise: uma revisão**. *Revista Brasileira de Engenharia Química*, v. 19, n. 3, p. 123-134, 2002.
- [19] MANO, E. B. **Introdução a Polímeros**. São Paulo: Edgard Blücher, 1985. MENEGUCCI, F. **Resíduos têxteis: análise sobre descarte e reaproveitamento nas indústrias de confecção**. *Congresso Nacional de Excelência em Gestão*, Rio de Janeiro, p. 1–12, 2015.
- [20] OKEKE, E. S. et al. **Microplastics in agroecosystems—impacts on ecosystem functions and food chain**. *Science of the Total Environment*, v. 801, 149634, 2022.
- [21] PALME, A.; PETERSON, A.; DE LA MOTTE, H.; THELIANDER, H.; BRELLID, H. **Development of an efficient route for combined recycling of PET and cotton from mixed fabrics**. *Textiles and Clothing Sustainability*, 2017.
- [22] PASCHOALINO, M. P.; MARCONE, G. P. S.; JARDIM, W. F. **Os nanomateriais e a questão ambiental**. *Química Nova*, v. 33, 2010.
- [23] PATKAR, M.; JABARIN, S. A. **J. Appl. Polym. Sci.**, v. 47, p. 1749, 1993.
- [24] PAUL, D.; GOODMAN, I.; KROSCWITZ, J. I. **Polyesters to Polypeptide Synthesis**. In: *Encyclopedia of Polymer Science and Engineering*, 2nd ed., vol. 12. New York: Wiley, 1985.
- [25] PAULA, M. M. D. et al. **Synthesis, characterization and antibacterial activity studies of poly{styrene-acrylic acid} with silver nanoparticles**. *Mater. Sci. Eng. C*, v. 29, p. 647–650, 2009.
- [26] PINHO, E. B.; COSTA, H. M.; RAMOS, V. D. **Análise técnica do uso de resíduos de poliéster na indústria têxtil**. Rio de Janeiro: UERJ/UNESA, 2023.
- [27] RILLIG, M. C. et al. **Microplastics and their ecological impacts: a review**. *Frontiers in Environmental Science*, 2017.
- [28] RODRIGUES, M. A.; RUGGIERO, R.; GUERRA, W. **Compostos inorgânicos como fármacos**. *Boletim da Sociedade Portuguesa de Química*, n. 115, p. 25-30, 2009.
- [29] ROMÃO, W.; SPINACÉ, M. A. S.; DE PAOLI, M. A. **Poli(tereftalato de etileno), PET: uma revisão sobre os processos de síntese, mecanismos de degradação e sua reciclagem**. *Polímeros*, v. 19, n. 2, p. 19-28, 2009.
- [30] SAMPERI, F.; PUGLISI, C.; ALICATA, R.; MONTAUDO, G. **Polym. Degrad. Stab.**, v. 83, p. 3, 2004.
- [31] SANTOS, I. S.; LOPES, D. A. T. G. **Impactos ambientais gerados pelos resíduos têxteis no Brasil e alternativas para o futuro: uma revisão sistemática**. *XXXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, Santos, SP, 2019.
- [32] SANTOS, S. **Impacto ambiental causado pela indústria têxtil**. UFSC – Engenharia de Produção e Sistemas, 2012.
- [33] SCHEIRS, J. **Polymer Recycling: Science, Technology and Applications**. London: John Wiley, 1998.
- [34] SEBRAE. **Adote práticas para diminuir resíduos na produção de moda**. 2023. Disponível em: <https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/adote-praticas-para-diminuir-residuos-na-producao-de-moda,d37cae21e224f410VgnVCM1000004c00210aRCRD>. Acesso em: fev. 2025.
- [35] SEATON, A.; DONALDSON, K. **Nanoscience, nanotoxicology, and the need to think small**. *The*

Lancet, v. 18, p. 923–924, 2005.

- [36] SILVER, S. **Bacterial silver resistance: molecular biology and uses and misuses of silver compounds.** *FEMS Microbiology Reviews*, v. 27, p. 341–353, 2003.
- [37] SOBRAL, P.; FRIAS, J.; MARTINS, J. **Microplásticos nos oceanos – um problema sem fim à vista.** *Ecologi@*, Lisboa, n. 3, p. 12–21, 2011.
- [38] SPIRO, T. G.; STIGLIANI, W. M. **Química Ambiental.** 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- [39] SOUZA, G. D.; RODRIGUES, M. A.; SILVA, P. P.; GUERRA, W. **Prata: breve histórico, propriedades e aplicações.** 2013.
- [40] SOUZA, P. F. et al. **Propriedades físico-químicas da prata.** *Revista Química Nova*, 2023.
- [41] TONIOLO, M.; ZANCAN, P.; WÜST, C. **Indústria têxtil: sustentabilidade, impactos e minimização.** *VI Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental*, Porto Alegre, p. 1-5, 2015.
- [42] WANG, Y. **Recycling in Textiles.** Cambridge/Boca Raton: Woodhead/CRC Press, 2006.
- [43] YOU, C.; HAN, C.; WANG, X.; ZHENG, Y.; LI, Q.; HU, X.; SUN, H. **The progress of silver nanoparticles in the antibacterial mechanism, clinical application and cytotoxicity.** *Int. J. Nanomedicine*, 2012.
- [44] ZANIN, M.; MANCINI, S. D. **Capítulo 3 – A Reciclagem de Plásticos.** In: *Tecnologia e Gestão da Reciclagem*. Editora Técnica, 2009.
- [45] ZODROW, K.; BRUNET, L.; MAHENDRA, S.; LI, D.; ZHANG, A.; LI, Q.; ALVAREZ, P. J. J. **Polysulfone ultrafiltration membranes impregnated with silver nanoparticles show improved biofouling resistance and virus removal.** *Water Research*, v. 43, p. 715–723, 2009.
- [46] ZONATTI, W. F.; AMARAL, M. C.; GASI, F.; BARUQUE-RAMOS, J.; DULEBA, W. **Reciclagem de resíduos do setor têxtil e confeccionista no Brasil: panorama e ações relacionadas.** Universidade de São Paulo, São Paulo, 20 p., 2015.

Capítulo 10

Synthesis and characterization of chromium-free black pigment from the $\text{SrO-Fe}_2\text{O}_3\text{-Mn}_2\text{O}_3$ system via combustion method

Catia Fredericci

Marilia Santos Menossi Mortari

Fabiano Ferreira Chotoli

Leandro Augusto

Abstract: Chromium-free black pigments are promising candidates for use in enamels for ceramic glazes and for heat-absorbing applications, such as the black bands on automotive windshields and rear windows. In this work, a black pigment from the $\text{SrO-Fe}_2\text{O}_3\text{-Mn}_2\text{O}_3$ system was synthesized by combustion reaction. The powders were heat-treated at 600 °C/1 h, 900 °C/3 h, and 1100 °C/3 h, and subsequently analyzed by qualitative and quantitative X-ray diffraction and scanning electron microscopy. The color properties of the pigments were characterized using CIELab colorimetric coordinates. Crystalline $\text{SrFeO}_{2.5-3.0}$, $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$, and $\text{Sr}(\text{Fe}_{0.95}\text{Mn}_{0.05})\text{O}_{2.76}$ were identified as the predominant phases in the powders treated at 900 °C and 1100 °C. The color parameters of the enamel containing the powder treated at 900 °C were comparable to those of an enamel prepared with a commercial copper chromite black pigment widely used in the automotive industry.

1. INTRODUCTION

Black pigments based on copper chromite are commonly used in glass enamels for the black bands of windshields and rear windows of vehicles [1]. However, in light of government requirements concerning the recycling and disposal of automobiles and automotive parts, it is advisable to develop chromium-free black pigments, and preferably those free from transition metals altogether [1].

The glass enamel used for black band applications is a mixture of a glass frit (nowadays often based on bismuth oxide [2]), pigment, and resin, with a viscosity suitable for application by screen printing onto flat soda–lime–silica glass. The screen-printed glass is then subjected to molding and pressing at 700 °C for approximately 5 minutes to achieve the desired curvature and bond the enamel to the surface.

Houmes [1] reported that compounds with the general formula ($A_xFe_yMn_{1-y}O_z$) are suitable as black pigments, where A may be Ca, Sr, Ba, Mg, or lanthanides, with strontium being the most favorable. Regarding x, y, and z, he indicated that the preferred composition should satisfy $0.99 \leq x \leq 0.16$, $0.5 \leq y < 1.0$, and $(x+1) \leq z \leq (x+3)$. The main advantage of such pigments is the absence of highly toxic heavy metals, which facilitates recycling and disposal of the final products. Holmes [1] also described the preparation of a pigment by solid-state reaction from 1 mol of $SrCO_3$, 0.35 mol of Fe_2O_3 , and 0.1 mol of Mn_3O_4 , heat-treated at 1038 °C for 6 h, possibly aiming to produce $SrFe_{0.7}Mn_{0.3}O_{2.5}$. Unfortunately, no X-ray diffraction patterns or colorimetric parameters were reported.

Although some studies have been published on the SrO – MnO_2 [3] and SrO – Fe_2O_3 [4] systems for the production of black pigments, investigations on the SrO – Fe_2O_3 – Mn_2O_3 system remain scarce. Lai *et al.* [5] studied the preparation of $SrMn_{1-x}Fe_xO_{3-\delta}$ black pigments by solid-state reaction.

The present study aims to investigate the synthesis of black pigments based on the strontium–iron–manganese oxide system. In particular, the combustion reaction method will be explored for pigment production, since this technique has attracted increasing interest for the preparation of oxide powders [6–10].

2. EXPERIMENTAL

2.1. SYNTHESIS OF POWDERS

For the synthesis, 1 mol of $Sr(NO_3)_2$, 1.4 mol of $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$, and 0.6 mol of $Mn(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ (all from Synth), together with 6.67 mol of urea (NH_2CONH_2 , Junsei Chemical Co.), were used. The reagents were dissolved in 70 mL of distilled water in a porcelain crucible and heated on a hot plate at about 100 °C under stirring until a viscous solution was obtained. The crucible was then transferred to a preheated muffle furnace at 600 °C for ignition and maintained at this temperature for 1 h.

The as-prepared combustion powder was ground and homogenized in a mortar, and then divided into three portions: one was kept as prepared (BP600); the second was heat-treated at 900 °C for 3 h (BP900), and the third at 1100 °C for 3 h (BP1100). After soaking, the furnace was turned off and the samples were allowed to cool slowly to room temperature. Finally, the powders were ground in an agate mill and sieved through a 325-mesh sieve.

2.2. CHARACTERIZATION OF POWDERS

The crystalline phases were characterized by X-ray powder diffraction (XRD) using a Shimadzu XRD-6300 diffractometer with Co K α radiation, in the 2θ range of 15–70°, with a step size of 0.02° and a counting time of 4 s per step. Quantitative phase analysis was performed using X'Pert HighScore Plus (version 3.0) software, applying the Reference Intensity Ratio (RIR) method and Rietveld refinement, with diffractometric standards and structural data from the ICDD database. Up to 40 independent variables were refined, including scale factors, zero-point, background parameters, unit cell dimensions, and profile coefficients. The agreement indices for the final least-squares cycles were reported in terms of Rwp (%) and GOF (goodness of fit, %).

Particle size and morphology were examined by scanning electron microscopy (FEI Quanta 3D FEG).

The color properties of the pigments (BP600, BP900, and BP1100) and of a commercial copper chromite black pigment were evaluated using CIELAB color measurements with a BYK Gardner spectrophotometer (Color Guide Sphere d/8 spin model), employing a D65 illuminant and a 10° standard observer. Three measurements were performed for each pigment. The L*, a*, and b* coordinates, corresponding to lightness, red–green, and yellow–blue components, respectively, were reported.

2.3. TEST OF THE PIGMENT

To evaluate the pigments for application in black bands of windshields and rear windows, an enamel was prepared containing 58 wt% of a commercial bismuth-based glass (donated by Ticon Conductive Paste), 24 wt% of the synthesized pigments, and 18 wt% of resin. The same formulation was also prepared using a commercial copper chromite black pigment for comparison. The enamels were screen-printed onto soda-lime silica (SLS) glass substrates ($\approx 45 \text{ mm} \times 27 \text{ mm}$, thickness 1.5 mm) through a 160-mesh screen. The coated substrates were dried in an oven at 80 °C for 30 min, heated at 410 °C for 5 min to decompose the resin, and then heat-treated at 700 °C for 5 min, resulting in a thick enamel film. The CIELAB color parameters of the films were subsequently measured.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. X RAY DIFFRACTION ANALYSIS

Figure 1 shows the X-ray diffraction patterns of samples BP600, BP900, and BP1100, and Table 1 presents the quantitative phase analysis obtained by Rietveld refinement. As an example of the Rietveld refinement analysis, Figure 2 shows the diffractogram of the sample heat-treated at 600 °C for 1 h.

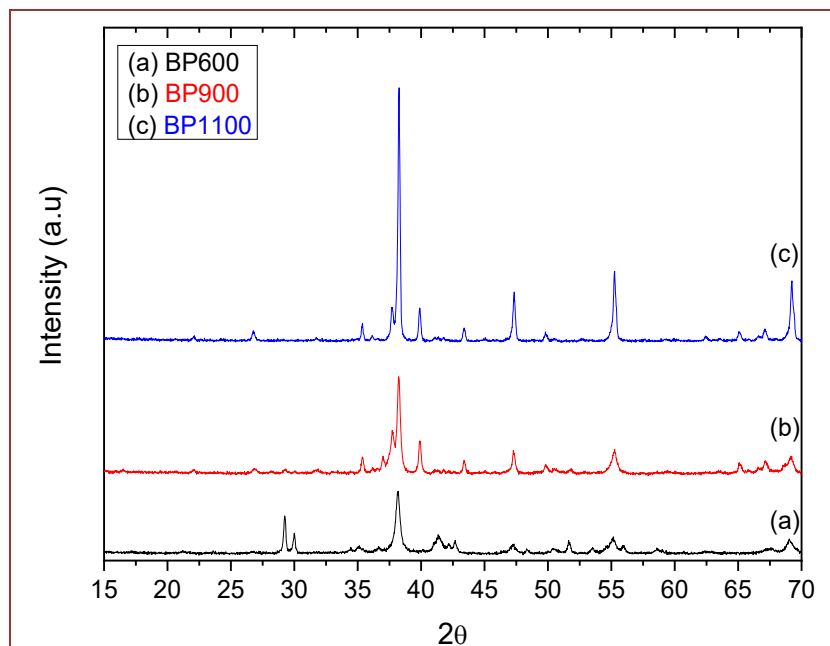
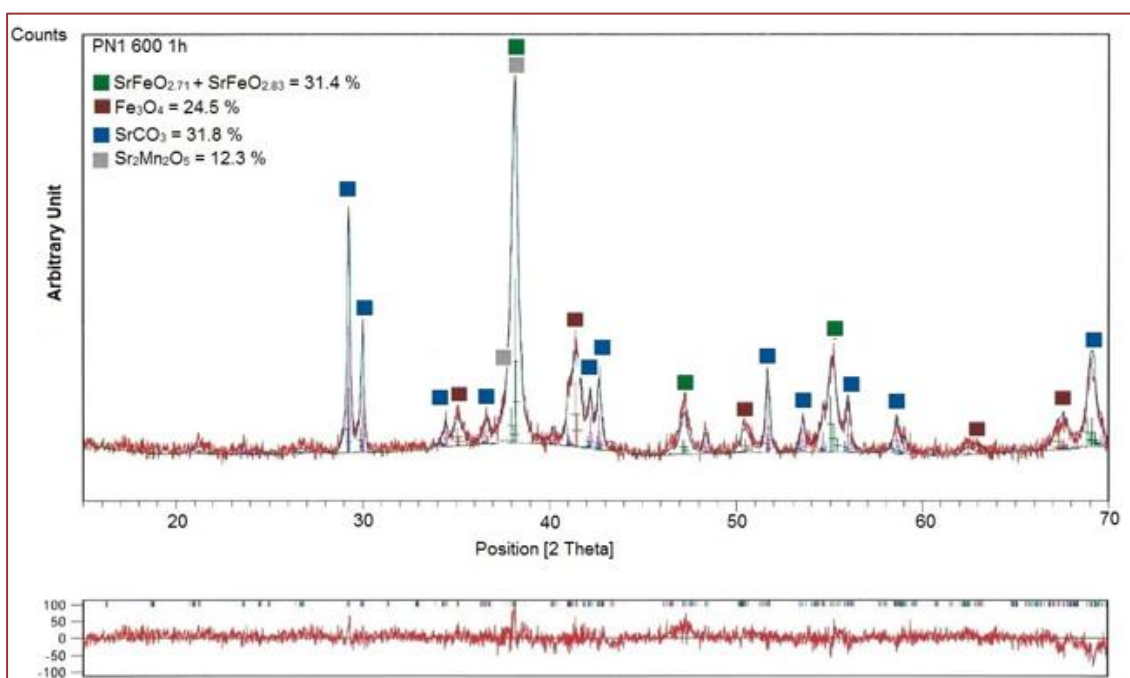
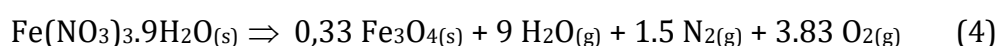
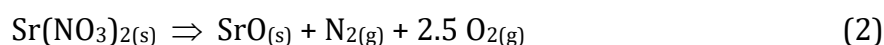
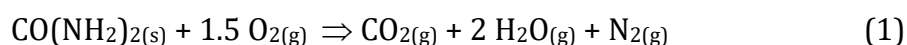
Figure 1. X-ray diffractogram patterns of BP600, BP900 and BP1100**Figure 2.** X-ray diffractogram pattern of BP600 determined by Rietveld method. Gof = 1.53

Table 1. Crystalline phase composition of the prepared powders determined by Rietveld refinement method. ICDD corresponds to the card used for determining the crystalline phase

Crystalline Phase/ICDD Card	BP600	BP900	BP1100
SrCO ₃ / (005-0418)	31,8	-	-
Fe ₃ O ₄ / (01-076-1849)	24,5	-	-
SrFeO _x (x=2.71-2.83) / (049-1585) e (033-0678)	31,4	55,7	37,9
Sr ₂ Mn ₂ O ₅ (*)	12,3	-	-
SrFe ₁₂ O ₁₉ / (033-1340)	-	33,4	33,5
SrMnO ₃ / (024-1221)	-	8,2	5,9
SrFe ₂ O ₄ / (01-082-0414)	-	2,7	-
Sr(Fe _{0.95} Mn _{0.05})O _{2.76} / (01-080-7043)	-	-	22,6

ICDD- International Center for Diffraction Data (*) Sajjad *et al.*, 2023 [11].

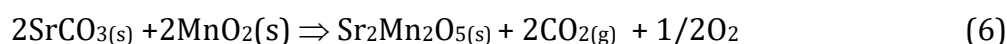
The formation of SrCO₃, Fe₃O₄, SrFeO_x (2.75–3.0), and Sr₂Mn₂O₅ was observed in sample BP600 after heat treatment at 600 °C for 1 h. Fumo *et al.* [12] studied the combustion reaction to prepare Sr(Fe_{0.5}Ti_{0.5})O₃ and also observed the formation of strontium carbonate and Fe₃O₄ after the combustion of Sr(NO₃)₂, Fe(NO₃)₃·9H₂O, Ti[O(CH₂)₃CH₃]₄, and urea. They reported some of the reactions involved in the combustion synthesis, as follows:



These reactions can account for the formation of SrCO₃ and Fe₃O₄ during the combustion of a mixture of strontium, iron, and manganese nitrates. Stern [13] reported that Mn(NO₃)₂ decomposes to MnO₂ upon heating, according to the following reaction:



Considering the decomposition of manganese nitrate (Reaction 5) it is possible to suppose that Sr₂Mn₂O₅ formed due the reaction:



Falcón *et al.* [14] studied the black SrFeO_{3-δ} perovskite (0 < δ < 0.5) prepared from the reaction of Sr(NO₃)₂·4H₂O and Fe(NO₃)₃·9H₂O, dissolved in citric acid, and heat-treated at 800 °C for 2 h in air. They reported that this material contains iron in intermediative valence state such as Fe³⁺ - Fe⁴⁺. Possible reactions leading to the formation SrFeO_{2.83} and SrFeO_{2.71} are:



As the compounds did not react completely during the ignition to form the strontium–iron–manganese oxide, the powder obtained after the combustion reaction was subsequently heat-treated at 900 °C and 1100 °C, both for 3 h. Figure 1 and Table 1 show that at 900 °C the powder no longer contained SrCO_3 and Fe_3O_4 , suggesting that these compounds reacted, as the amount of SrFeO_3 increased to 55.7 wt% compared to 31.4 wt% in BP600 (Table 1). Furthermore, the reaction of residual strontium carbonate and magnetite led to the formation of $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$, likely according to the following reaction:



From 600 °C to 900 °C the $\text{Sr}_2\text{Mn}_2\text{O}_5$ was decomposed to SrMnO_3 that reacted with SrFeO_x at 1100°C to form $\text{Sr}(\text{Fe}_{0.95}\text{Mn}_{0.05})\text{O}_{2.76}$ since the quantities of SrFeO_x ($x=2.71$ and 2.83) and SrMnO_3 decreased through heat treatment from 900 °C to 1100 °C:



3.2. SCANNING ELECTRON MICROSCOPY ANALYSIS

Figure 3 shows a SEM micrograph of a black pigment based on chromium–copper oxide. Figures 4(a–c) show representative SEM micrographs of BP600, BP900, and BP1100. The images reveal that the powder obtained after combustion synthesis and heat-treated at 600 °C for 1 h forms agglomerates (Figure 4a), with individual particle sizes below 100 nm, which is typical for powders obtained by combustion synthesis. In contrast, the powders heat-treated at 900 °C and 1100 °C for 3 h exhibit increased primary particle sizes (Figures 4b and 4c) due to sintering of the nanoparticles, reaching sizes above 500 nm and 5 µm, respectively.

Figure 3. (a) SEM micrograph of the black pigment based on chromium copper oxide, (b) EDS spectrum of the region in yellow in (a)

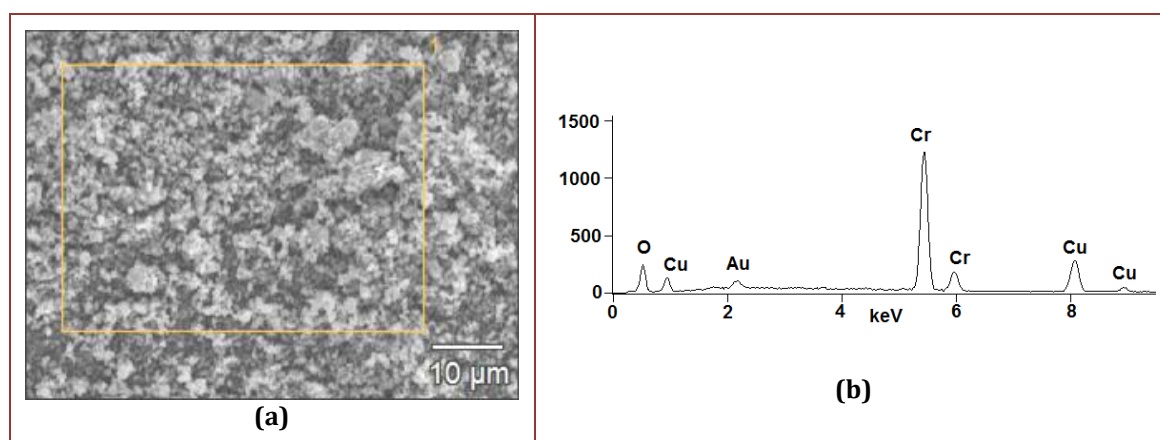
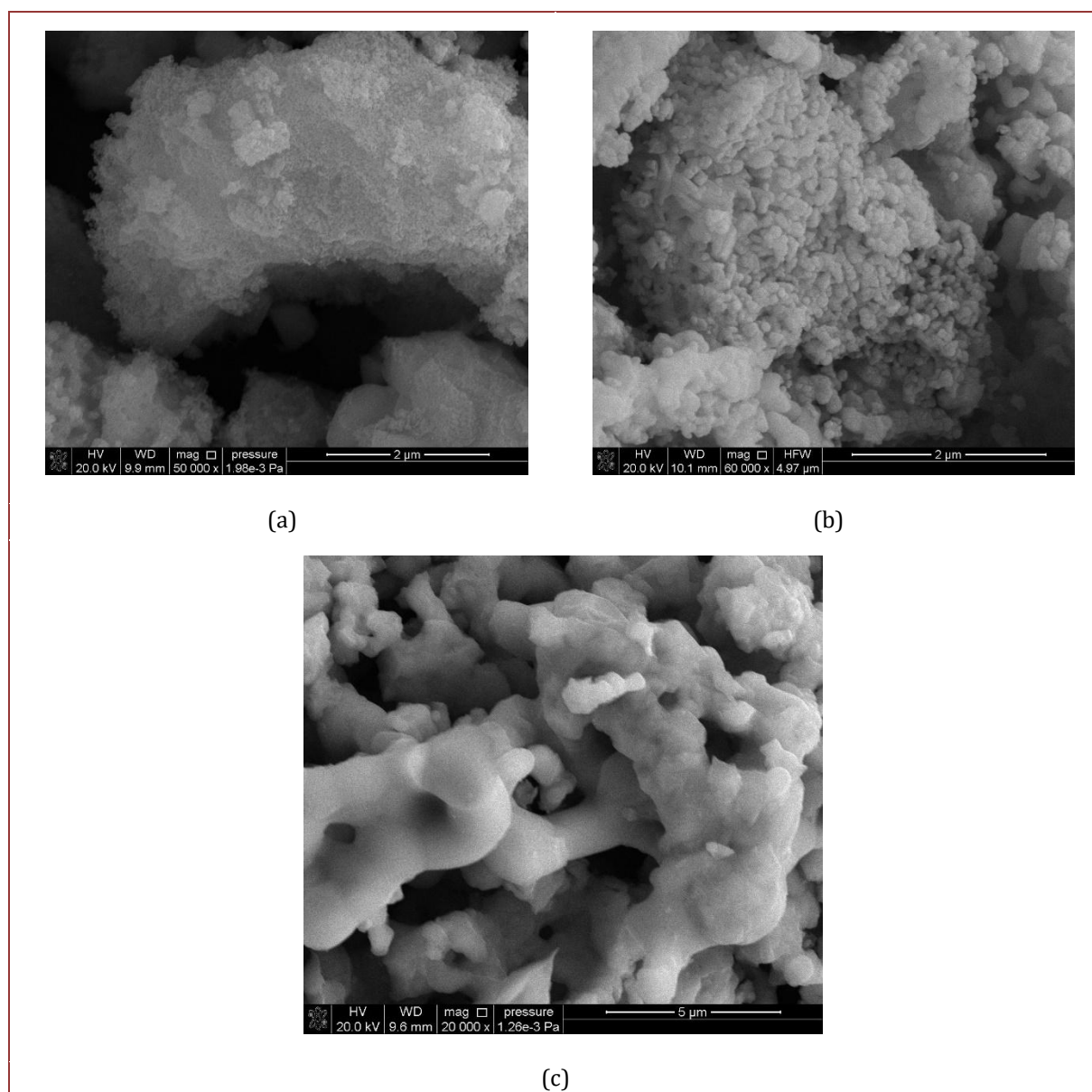


Figure 4. SEM micrograph: (a) BP600, (b) BP900 and (c) BP1100

3.3. COLORIMETRIC ANALYSIS

The colorimetric parameters of the pure pigments are shown in Table 2. While BP600 and BP1100 present higher L^* values (brightness) than the commercial black pigment, BP900 exhibits the lowest L^* value. BP600 and BP900 show positive a^* (red) and b^* (yellow) values, in contrast to BP1100 and the commercial copper chromite [15], which tend to negative b^* values. These differences can be attributed to the interaction of light with the different crystalline phases present in the samples.

Significant differences are observed between the colorimetric parameters of the pure pigments and those of the enamels prepared with them. The L^* values are higher for all enamels compared to the corresponding pure pigments. The enamel, after heat treatment at 700 °C for 5 min, develops a glassy phase that is essential for adhering the enamel to flat soda-lime silica glass. Consequently, the enamel is a mixture of glassy and crystalline phases, which is responsible for the increase in L^* [16]. BP600 and BP1100 enamels

exhibit higher a^* values (red), giving them a slightly brownish color, as shown in Figure 5. The BP900 enamel exhibits colorimetric parameters closer to those of the enamel prepared with the commercial pigment.

Table 2. Colorimetric parameters of the pigments

Powder Sample	L^*	a^*	b^*
Commercial (chromite-copper)	$18,6 \pm 0,04$	$0,3 \pm 0,02$	$-0,6 \pm 0,02$
BP600	$22,1 \pm 0,01$	$0,9 \pm 0,02$	$2,2 \pm 0,04$
BP900	$14,6 \pm 0,05$	$1,0 \pm 0,10$	$1,7 \pm 0,06$
BP1100	$27,2 \pm 0,04$	$-0,10 \pm 0,04$	$-0,7 \pm 0,06$
Thick Film			
Commercial (chromite-copper)	$30,2 \pm 0,02$	$0,47 \pm 0,01$	$0,20 \pm 0,01$
BP600	$34,9 \pm 0,08$	$0,84 \pm 0,02$	$0,47 \pm 0,01$
BP900	$32,7 \pm 0,03$	$0,25 \pm 0,01$	$0,42 \pm 0,02$
BP1100	$34,2 \pm 0,20$	$1,14 \pm 0,01$	$0,36 \pm 0,03$

Figure 5. Thick films of enamels prepared with (a) commercial copper-chromite pigment, (b) BP600, (c) BP900 and (d) BP1100 heat-treated at 700 °C for 5 min



4. CONCLUSIONS

Black pigments were obtained from the $\text{SrO-Fe}_2\text{O}_3\text{-Mn}_2\text{O}_3$ system via combustion synthesis. However, a mixture of crystalline phases formed instead of $\text{SrFe}_{1.4}\text{Mn}_{0.6}\text{O}_4$, even after heat treatment up to 1100 °C. The enamel produced with these pigments, after heat treatment at 700 °C for 5 min, showed higher L^* values than the pure pigment, due to the formation of a Bi_2O_3 -based glassy phase, which is necessary to bond the enamel to the soda-lime silicate glass. The enamel prepared with the pigment heat-treated at 900 °C for 3 h exhibited colorimetric parameters closer to those of a commercial black pigment (copper chromite), indicating its potential as a pigment for automotive black bands.

REFERENCES

- [1] Houmes J.D. – Strontium iron manganese black pigment – US Patent 6,758,894 B1, 1-5, 2004.
- [2] Fredericci C, Yoshimura HN, Molisani AL, Fellegara H. Effect of TiO_2 addition on the chemical durability of $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-ZnO-B}_2\text{O}_3$ glass system. Journal of Non-Crystalline Solids, 354, 2008, 4777–4785. doi:10.1016/j.jnoncrysol.2008.04.026
- [3] Eppler RA – Black pigments free of heavy metals – US Patent 4,388,118, 1983, 1-4.
- [4] Hajjaji W, Pullar RC, Seabra MP, Dondi M, Labrincha JA – Compositional and chromatic properties of strontium hexaferrite as pigment for ceramic bodies and alternative from wiredrawing sludge – Dyes and Pigments, 96, 2013, 659-664. doi: 10.1016/j.dyepig.2012.10.011

- [5] Lai F, Shi W, Hu S, Li X, Chang Q, Wang Y, Wang Q. $\text{SrMn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{O}_{3-\delta}$ ($x = 0-1$) black ceramic pigment: Synthesis, color properties, and application. *Ceramics International*, 49, 17, Part B, 2023, 28824-28836. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2014.08.038
- [6] Chavarriaga EA, Wermuth TB, Arcaro S., Ramirez MA, Gómez A., Bezzon VDN, Orlando MTD, Alrcón J., Bergmann CP, Lopera AA. One-step synthesis of CoAl_2O_4 inorganic pigment by solution combustion: The impact of fuel and ammonium nitrate. *Ceramics International*, 50, 1, Part A, 2024, 45-54. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.09.205>
- [7] Ianos R, Tăculescu E-A, Păcurariu C, Niznansky D. $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ nanoparticles prepared by combustion synthesis, followed by chemical oxidation of residual carbon with H_2O_2 . *Materials Chemistry and Physics*, 148, 3, 2104, 705-711. doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.08.038
- [8] Granados-Correa F, BONIFACIO-Martínez J. Combustion synthesis process for the rapid preparation of high-purity SrO powders. *Materials Science-Poland*, 32(4), 2014, 682-687 DOI: 10.2478/s13536-014-0250-9
- [9] Rosales M, Oliva J, Desirena H, Salas P. Effect of Urea and Thiourea on the color emission of $(\text{Y}_x\text{Bi}_{1-x})_2\text{Zr}_2\text{O}_7\text{:Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ upconversion phosphors. *Optical Materials* 157 2024, 116307. doi.org/10.1016/j.optmat.2024.116307.
- [10] Arabi AM, Moeen Sh. J. Solution Combustion Synthesis of MnAl_2O_4 Brown Pigments Using Different Fuel Mixtures. *Progress in Color Colorants Coating* 15, 2022, 355-366.
- [11] Sajjad H, Shah SN, Nasreen S, Zahoor H, Rasheed MA, Maroof H. SrO-MnO/Ceramic: A Novel Bifunctional Catalyst for Biodiesel production via Simultaneous Transesterification- Esterification of Waste Frying Oil. *ChemistrySelect* 2023, 8, e202300696 (1 of 12). doi.org/10.1002/slct.202300696.
- [12] Fumo AD, Jurado JR, Segadães AM, Frade JR. – Combustion synthesis of iron-substituted strontium titanate perovskites – *Materials Research Bulletin*, 32(10), 1993, 1459-1470.
- [13] Stern KH – High Temperature Properties and Thermal Decomposition of Inorganic Salts with Oxianions. CRC Press LLC, 2001, pg 146.
- [14] Falcón H, Barbero JA, Alonso JA, Martínez-Lope MJ, Fierro JLG - $\text{SrFeO}_{3-\delta}$ Perovskite Oxides: Chemical Features and Performance for Methane Combustion – *Chemistry of . Materials*, 2002, 14, 2325-2333. <https://doi.org/10.1021/cm011292l>
- [15] Swiler DR, Axtell EA – Rare earths manganese oxide pigments – US Patent 6,541,112, 2003, 1-13.
- [16] Zybell P, Bertocchi R – Black glass pastes for glazing and their production – US Patent 5,250,475, 1993, 1-4.

Capítulo 11

Análise de aderência da distribuição de Weibull em função do método de estimativa dos parâmetros de forma e escala

Rafael Luz Espindola

Antonio Alisson Alencar Freitas

Resumo: Neste trabalho, uma rigorosa análise estatística foi utilizada para avaliar a aderência entre a distribuição de dados de velocidade do vento real e a distribuição de *Weibull*. O objetivo principal foi determinar qual dos sete métodos selecionados, usados para estimar os parâmetros de forma e escala, produz os melhores resultados. Esses sete métodos abrangem as abordagens empírica de Justus, empírica de *Lysen*, energia padrão, momento, máxima verossimilhança, máxima verossimilhança modificada, e gráfica. Os dados utilizados nesta análise abrangem o período de 2020 a 2022 e foram coletados por uma estação de monitoramento remoto situada na Universidade Federal Rural do Semi-Árido – *Campus* Caraúbas, no Rio Grande do Norte. Para avaliar a aderência entre os conjuntos de dados, empregou-se três testes estatísticos: o teste de *Kolmogorov-Smirnov*, a raiz do erro quadrático médio e o coeficiente de determinação. Uma análise dos dados reais forneceu informações valiosas sobre as características locais do vento, destacando uma velocidade média do vento predominantemente baixa e uma frequência de ocorrência de ventos abaixo de 3 m/s. Estes resultados sugerem um potencial limitado de energia eólica na área. No entanto, a consistência direcional do vento é notavelmente forte. Ao avaliar a aderência entre os dados reais e a distribuição de *Weibull*, todos os sete métodos apresentaram desempenho satisfatório, porém o método de máxima verossimilhança modificado apresentou o melhor resultado, oferecendo a representação mais precisa dos dados reais.

Palavras-chave: Energia Eólica, Probabilidade; Velocidade do vento.

1. INTRODUÇÃO

O mundo enfrenta uma crise climática sem precedentes, com eventos extremos acontecendo com frequências cada vez maiores (Cai, 2014). Dentre as diversas articulações governamentais que têm sido desenhadas nos últimos anos para tentar conter o aquecimento global e suas consequências climáticas, está a chamada transição energética. Esta transição é um processo paulatino e não-linear que objetiva a substituição da matriz energética atual por uma de caráter mais limpo, com impactos diretos e indiretos em diversos setores econômicos, criando oportunidades para países como o Brasil que já possuem uma matriz energética limpa, em comparação com a matriz mundial. As fontes de energia renovável, portanto, tem papel essencial na transição energética.

De acordo com REN21 (2023), a participação das fontes renováveis modernas no consumo de energia primária mundial em 2011 foi de 8,8%, correspondendo a um montante de 30 exajoules (EJ). Uma década depois, em 2021, o consumo dessas fontes de energia aumentou para 50 EJ, representando uma participação de 12,6% e evidenciando o forte crescimento que as fontes renováveis vêm tendo, em particular a solar e a eólica. Entretanto, devido ao crescimento do consumo mundial de energia em uma taxa superior ao do aumento do consumo das fontes renováveis, em termos absolutos, o que se observa é que o consumo de combustíveis fósseis aumentou nessa década. Isso mostra que apesar dos esforços empenhados na transição energética, um esforço ainda maior precisa ser realizado para que haja uma mudança de fato na matriz de consumo energético mundial.

Dentre as fontes renováveis modernas, a eólica tem se consolidado como uma das principais alternativas para auxiliar na transição energética. Com um crescimento constante desde o início dos anos 2000, a capacidade instalada em energia eólica saltou de 283 GW em 2012 para 906 GW em 2022 (REN21, 2023), um crescimento de aproximadamente 220% em 10 anos. Esse crescimento, em grande parte, foi puxado pela China, que em 2022 respondia por 40% da capacidade eólica onshore mundial instalada e, a título de exemplo, entre 2021 e 2022 sozinha foi responsável por adicionar 37,6 GW, praticamente metade, dos 77 GW acrescentados a capacidade mundial instalada (GWEC, 2023).

O Brasil, por sua vez, é o sexto país em capacidade eólica onshore instalada, com 3% da capacidade mundial, e grande potencial para aumentar sua participação, tendo em vista que tem sido um dos principais países a adicionar capacidade de geração eólica à matriz mundial. Entre 2021 e 2022, por exemplo, o Brasil foi responsável por 6% da capacidade de geração eólica instalada, ficando atrás apenas dos Estados Unidos e da China, responsáveis, respectivamente, por 13% e 47% da capacidade de geração eólica onshore acrescida nesse período (GWEC, 2023).

Diante da importância estratégica que a energia eólica vem apresentando nas últimas décadas, uma compreensão adequada do recurso eólico é de suma importância, principalmente objetivando a determinação de locais estratégicos com potencial para produção de energia. Devido a sua aleatoriedade, o vento é um processo estocástico, podendo seu comportamento ser analisado em função da sua distribuição de probabilidade de ocorrência. O principal modelo de distribuição utilizado para caracterizar o vento é a distribuição de Weibull (Chiodo e Lauria, 2009). De acordo com Oliveira Filho *et al.* (2018), as principais características que dão suporte ao uso da distribuição de Weibull para aplicações envolvendo energia eólica são: o fato dela ser centrada em torno da média e permitir descrever comportamentos assimétricos em torno

dela; incorporar casos particulares como a distribuição de Rayleigh; e depender de apenas dois parâmetros, o fator de forma (k) e o fator de escala (c). De acordo com os trabalhos de Hussain *et al.* (2023), Saeed *et al.* (2019), Kantar e Usta (2015), Andrade *et al.* (2014), Rocha *et al.* (2012), e Chang (2011) os parâmetros k e c podem ser obtidos por diversas metodologias. As mais recorrentes nesses e em outros trabalhos são: método empírico de Justus (MEJ); método empírico de Lysen (MEL); método da energia padrão (MEP); método do momento (MM); método da máxima verossimilhança (MMV); método da máxima verossimilhança modificado (MMVD); e método gráfico (MG).

Dessa forma, o presente trabalho tem por objetivo analisar sete metodologias passíveis de serem utilizadas para determinação dos parâmetros da função de distribuição de Weibull, bem como qual delas se ajusta melhor aos dados reais obtidos utilizando uma estação remota de monitoramento instalada na Universidade Federal Rural do Semi-Árido, no campus localizado na cidade de Caraúbas – RN.

2. FUNÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

A distribuição de Weibull vem sendo utilizada em diversas áreas incluindo a de avaliação de potencial eólico (Chang, 2011). Uma grande vantagem que ela possui é depender de apenas dois parâmetros (Oliveira Filho *et al.*, 2018). A função de distribuição de Weibull, apresentada na Eq. (1), fornece a fração do tempo em que a velocidade do vento apresenta uma velocidade específica ao longo do intervalo de tempo considerado (Koholé *et al.*, 2023). Por sua vez, a função de distribuição cumulativa de Weibull, apresentada na Eq. (2), fornece a probabilidade de a velocidade do vento ser inferior ou igual a um certo valor (Lysen, 1982).

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (1)$$

$$F(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (2)$$

onde v é a velocidade do vento, k é o adimensional parâmetro de forma e c é o parâmetro de escala, com a mesma unidade de v . Existem diversos métodos para se obter os dois parâmetros da distribuição de Weibull. A seguir são listados os sete métodos analisados neste trabalho.

2.1. MÉTODO EMPÍRICO DE JUSTUS (MEJ)

O MEJ foi proposto por Justus *et al.* (1978) e utiliza os valores da velocidade média e do desvio padrão da velocidade para determinar os parâmetros k (Eq. 3) e de c (Eq. 4) da distribuição de Weibull.

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^{-1,086} \quad (3)$$

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (4)$$

onde $\bar{v}$ é a velocidade média do vento, σ é o desvio padrão da velocidade do vento e $\Gamma(x)$ é a função gamma.

2.2. MÉTODO EMPÍRICO DE LYSÉN (MEL)

O MEL foi proposto por Lysén (1982) e difere do MEJ apenas no procedimento para obtenção de c (Eq. 5). O parâmetro k da distribuição de Weibull pode ser obtido pela Eq. (3).

$$c = \bar{v} \left(0,568 + \frac{0,433}{k} \right)^{-1/k} \quad (5)$$

2.3. MÉTODO DA ENERGIA PADRÃO (MEP)

O MEP utiliza o fator de energia padrão E_{pf} , definido como a razão entre a média do cubo da velocidade do vento e o cubo da média da velocidade do vento (Eq. 6), para obtenção dos parâmetros de Weibull.

$$E_{pf} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i)^3}{\bar{v}^3} \quad (6)$$

onde v_i é a i -ésima medida da velocidade do vento e n é o número de medições da velocidade do vento disponível. O fator de escala c pode ser obtido da mesma forma que no MEJ (Eq. 4). Já o parâmetro de forma k , de acordo com Akdag e Dinler (2009), é obtido a partir da Eq. (7).

$$k = 1 + \frac{3,69}{E_{pf}^2} \quad (7)$$

2.4. MÉTODO DO MOMENTO (MM)

O MM foi desenvolvido por Justus e Mikhail (1976), e utiliza um processo computacional iterativo de resolução da $\bar{v}$ (Eq. 8) e do σ (Eq. 9) para determinar os parâmetros k e c de Weibull.

$$\bar{v} = c \left[\Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \right] \quad (8)$$

$$\sigma = c \left[\Gamma \left(1 + \frac{2}{k} \right) - \Gamma^2 \left(1 + \frac{1}{k} \right) \right]^{1/2} \quad (9)$$

Isolando c e igualando as equações, pode-se obter a Eq. (10) como resultado. De acordo com Nilsen (2011), o valor de k é obtido a partir da raiz da Eq. (10), encontrada a partir da utilização de um método iterativo, como por exemplo o Newton-Raphson. O valor de c , por sua vez, pode ser obtido a partir da reorganização da Eq. (8), como mostra a Eq. (11).

$$\frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)} - \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^2 - 1 = 0 \quad (10)$$

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (11)$$

2.5. MÉTODO DA MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA (MMV)

De acordo com Koholé *et al.* (2023), o MMV é um método bastante utilizado na análise estatística e faz uso de iterações numéricas para a obtenção dos parâmetros k e c de Weibull. Steven e Smulders (1979) foram pioneiros na aplicação para dados de velocidade de vento, e propuseram que o fator de forma k e o fator de escala c podem ser obtidos a partir, respectivamente da Eq. (12) e Eq. (13).

$$k = \left[\frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^n v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(v_i)}{n} \right]^{-1} \quad (12)$$

$$c = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^k \right]^{1/k} \quad (13)$$

onde v_i é a i -ésima medida da velocidade do vento e n é o número de medições da velocidade do vento disponível.

2.6. MÉTODO DA MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA MODIFICADO (MMVD)

A utilização do MMVD pode ser considerada se os dados da velocidade do vento já estiverem na forma da distribuição de Weibull (Chang, 2011). A metodologia utilizada para se obter os parâmetros k e c é similar à aplicada no MMV. Seguro e Lambert (2000) indica a Eq. (14) e a Eq. (15) como sendo adequadas para obtenção dos parâmetros de forma e escala, respectivamente, a partir da aplicação deste método.

$$k = \left[\frac{\sum_{i=1}^n v_i^k \ln(v_i) f(v_i)}{\sum_{i=1}^n v_i^k f(v_i)} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(v_i) f(v_i)}{f(v \geq 0)} \right]^{-1} \quad (14)$$

$$c = \left[\frac{1}{f(v \geq 0)} \sum_{i=1}^n v_i^k f(v_i) \right]^{1/k} \quad (15)$$

onde v_i é a velocidade do vento centrada no i -ésimo intervalo (bin), n é o número de bins e $f(v \geq 0)$ é a probabilidade de o vento ser maior ou igual a zero.

2.7. MÉTODO GRÁFICO (MG)

O MG utiliza a regressão dos mínimos quadrados para interpolar uma reta nos dados de velocidade de vento dividido em bins. A partir da aplicação dupla da função logaritmo na função de distribuição cumulativa de Weibull (Eq. 2), ela pode ser expressa conforme a Eq. (16).

$$\ln\{-\ln[1 - F(v)]\} = k \ln(v) - k \ln(c) \quad (16)$$

A Eq. (16) pode ser reescrita na forma de uma equação linear $y = ax + b$, a partir das substituições: $x = \ln(v)$, $y = \ln\{-\ln[1 - F(v)]\}$, $a = k$, e $b = -k \ln(c)$. Dessa forma, o método dos mínimos quadrados pode ser utilizado para determinar os valores de a e b , que serão utilizados para determinar os parâmetros k (Eq. 17) e c (Eq. 18) de Weibull.

$$k = a \quad (17)$$

$$c = e^{-b/k} \quad (18)$$

3. PARÂMETROS ESTATÍSTICOS PARA ANÁLISE DE ADERÊNCIA

A análise de aderência entre os dados medidos pela estação de monitoramento remoto instalada na cidade de Caraúbas – RN e as distribuições de Weibull, construídas utilizando os métodos apresentados para obtenção dos parâmetros de forma e escala, foi feita utilizando-se três indicadores estatísticos: o teste Kolmogorov-Smirnov (KS); a raiz do erro quadrático médio ($RMSE$); e o coeficiente de determinação (R^2).

3.1. TESTE KOLMOGOROV-SMIRNOV (KS)

De acordo com Chang (2011), o teste Kolmogorov-Smirnov é definido como o erro máximo entre duas funções de distribuição cumulativa, conforme a Eq. (19).

$$KS = \max|F(v) - O(v)| \quad (19)$$

onde $F(v)$ e $O(v)$ são, respectivamente, a função de distribuição cumulativa de Weibull e a função de distribuição cumulativa a partir dos dados observados. O teste KS é um teste de hipótese nula, dessa forma, quanto menor o valor encontrado, maior a aderência dos dados observados à distribuição testada (Oliveira, 2023). O valor crítico do teste KS para uma confiança de 95% pode ser obtido a partir da Eq. (20) (Chang, 2011).

$$KS_{95} = \frac{1,36}{\sqrt{n}} \quad (20)$$

onde n é o tamanho da amostra dos dados utilizados no teste. Para que o teste atinja o nível de confiança de 95%, é necessário que o valor KS encontrado seja inferior ao do valor crítico KS_{95} .

3.2. RAIZ DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO (RMSE)

O *RMSE* avalia o grau de dispersão de duas variáveis correlatas em torno do valor médio esperado (Andrade *et al.*, 2014), utilizando a Eq. (21). Dessa forma, quanto mais próximo de zero, maior a confiança na semelhança entre os dados observados e aqueles obtidos a partir da função de distribuição de Weibull.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (21)$$

onde x_i é a frequência de ocorrência da i -ésima velocidade do vento obtida a partir da distribuição de Weibull e y_i é a frequência de ocorrência da i -ésima velocidade do vento obtida a partir dos dados observados.

3.3. COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO (R^2)

O coeficiente de determinação pode ser obtido pela Eq. (22), e serve para avaliar a relação linear entre dados medidos experimentalmente e aqueles obtidos a partir da distribuição de Weibull (Koholé *et al.*, 2023). Ele é um valor entre 0 e 1, onde valores mais próximos de 1 indicam melhor aderência entre os dois conjuntos de dados.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - z_i)^2 - \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - z_i)^2} \quad (22)$$

onde x_i é a frequência de ocorrência da i -ésima velocidade do vento obtida a partir da distribuição de Weibull, y_i é a frequência de ocorrência da i -ésima velocidade do vento obtida a partir dos dados observados, z_i é a média de todas as frequências de ocorrência de velocidade de vento obtidas a partir dos dados observados, e n é o número de dados.

4. DADOS UTILIZADOS

Os dados de vento utilizados neste trabalho são oriundos de uma estação de monitoramento remoto da marca HOBO, modelo RX3000, instalado na Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), no campus localizado na cidade de Caraúbas – RN, como mostra a Figura 1. A estação está em operação desde 10/01/2019 e disponibiliza dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, direção do vento, rajada de vento, radiação solar global, temperatura de ponto de orvalho e o índice pluviométrico, em intervalos de 5 minutos e a uma altura de aproximadamente 2 m em relação ao solo.

Figura 1 – Estação de monitoramento remoto HOB0 RX Station – RX3000, localizada na UFERSA – Campus Caraúbas



Foram utilizados os dados de anos completos disponíveis no período de realização do presente trabalho. Dessa forma, as análises realizadas levaram em consideração os dados referentes aos anos de 2020 a 2022. Apesar de no ano de 2019 teoricamente estarem faltando apenas 9 dias de dados, tendo em vista que a estação começou a operar em 10 de janeiro do referido ano, optou-se por não utilizar esses dados por compreender o início da operação da estação, e ter havido algumas paradas para ajustes, gerando assim uma base de dados bastante incompleta naquele ano.

Além da altura em que está instalado o anemômetro da estação de monitoramento, foi analisado o comportamento do vento em outras 3 alturas: 25 m, 50 m e 75 m. Os valores de velocidade do vento nas alturas mencionadas foram obtidos a partir de extrapolação, utilizando-se a lei logarítmica fornecida pela Eq. (23). Essa formulação é bastante utilizada para esse propósito como evidencia Bañuelos-Ruedas *et al.* (2010).

$$v(z) = v(z_r) \frac{\ln(z) - \ln(z_0)}{\ln(z_r) - \ln(z_0)} \quad (23)$$

onde $v(z)$ é a velocidade na altura para a qual se deseja fazer a extrapolação, $v(z_r)$ é a velocidade conhecida em uma determinada altura, z é a altura para a qual se deseja fazer a extrapolação, z_r é a altura de referência na qual se conhece a velocidade do vento, e z_0 é a altura relacionada com a rugosidade do terreno. Como o local onde a estação de monitoramento remoto está instalada apresenta, na direção predominante do vento, um terreno descampado, foi adotado $z_0 = 0,03$, conforme valores indicados por Bañuelos-Ruedas *et al.* (2010).

A partir da base de dados para o período de 2020 a 2022, foi feita a caracterização do vento que incluiu: o comportamento médio diário da velocidade do vento; as direções predominantes de incidência do vento e a frequência de ocorrência da velocidade do vento nessas direções; a densidade de potência do vento, a partir da Eq. (24); e a distribuição de probabilidade de ocorrência da velocidade do vento. A partir dessa última análise foi possível determinar os parâmetros de Weibull usando as equações descritas anteriormente, e por fim, proceder a análise de aderência entre a distribuição real e as estimadas a partir de Weibull.

$$DP = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} v^3 f(v) dv \quad (24)$$

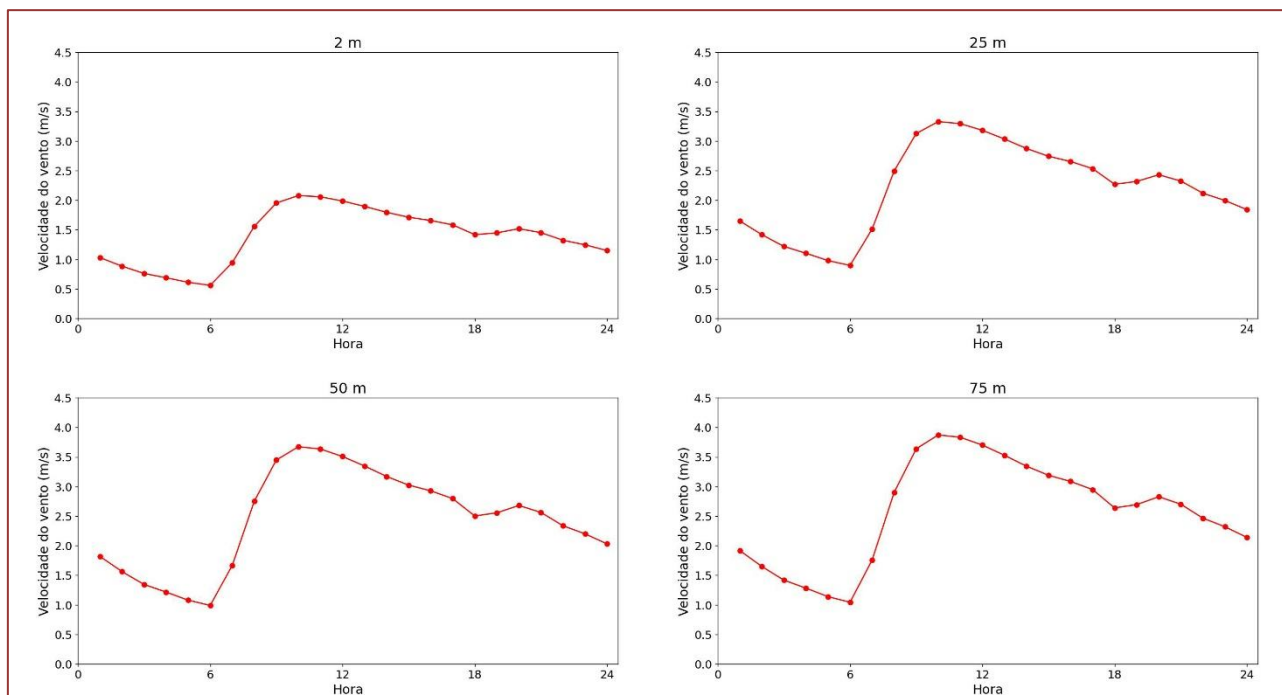
onde ρ é a massa específica do ar em kg/m^3 , v é a velocidade do vento em m/s e $f(v)$ é a frequência com que velocidade do vento ocorre. A Eq. (24) permite uma maior precisão em comparação com o cálculo da DP utilizando a velocidade média do vento (Jain, 2011), tendo em vista a dependência cúbica da DP com a velocidade.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. CARACTERIZAÇÃO DO VENTO

A partir dos dados de velocidade e direção do vento para o período mencionado, foi possível caracterizar o vento no local. A Figura 2 apresenta a média horária da velocidade do vento ao longo de um dia, considerando os 3 anos de dados analisados, para as quatro alturas mencionadas. Pode-se observar que a menor média de velocidade do vento acontece às 6 h, enquanto a máxima ocorre às 10 h. Isso deve-se, em grande parte, ao período de estabilização da camada limite atmosférica em decorrência da ausência de aquecimento solar durante a noite, e a consequente desestabilização com o aumento da incidência solar após o amanhecer, o que leva ao aumento da intensidade dos ventos no período da manhã.

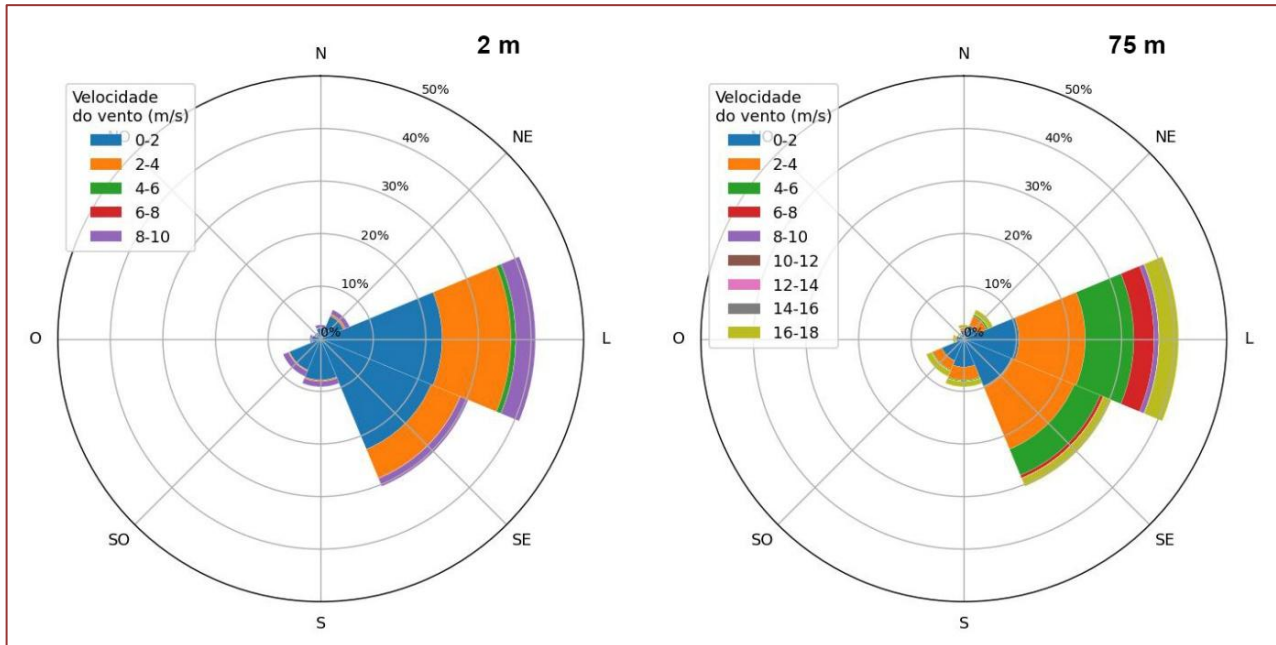
Figura 2 – Média horária da velocidade do vento no período 2020-2022, em Caraúbas – RN, nas alturas de 2 m, 25 m, 50 m, e 75 m em relação ao solo



Outra característica importante que pode ser observada na Figura 2 diz respeito aos valores máximos da média horária da velocidade do vento no local. Mesmo quando extrapolado para 75 m, a velocidade máxima do vento não ultrapassa 4 m/s, valor este muito abaixo do desejado para geração eólica. De acordo com Jain (2011), para um local ser viável para aproveitamento eólico, ele precisa ter médias superiores a 7 m/s a 50 m de altura, o que indica que o local onde a estação de monitoramento remoto está instalada apresenta baixo potencial para geração eólica, independentemente da altura de instalação da turbina.

A Figura 3 apresenta outra análise que os dados disponíveis na estação de monitoramento remoto permitem que seja realizada, a frequência de ocorrência do vento em determinada direção. Como pode ser notado, o vento no local apresenta direção predominante de leste, com quase 40% dos ventos vindos desta direção. Outros 30% têm incidência na direção sudeste. Dessa forma, quando agrupamos essas duas direções, temos que cerca de 70% de todas as medições do vento foram provenientes de uma região não muito maior que 90°, o que indica uma forte regularidade do vento em termos direcionais. Com relação à velocidade do vento nessas direções, a Figura 3 indica que, somadas as duas direções predominantes, velocidades inferiores a 2 m/s ocorrem mais de 40% do tempo, enquanto velocidades entre 2 m/s e 4 m/s ocorrem cerca de 20% do tempo. Por outro lado, valores acima de 7 m/s não chegam a ocorrer nem em 10% do tempo. Esse fato reforça o baixo potencial para geração de energia a partir da fonte eólica que o local já havia indicado quando da análise anterior.

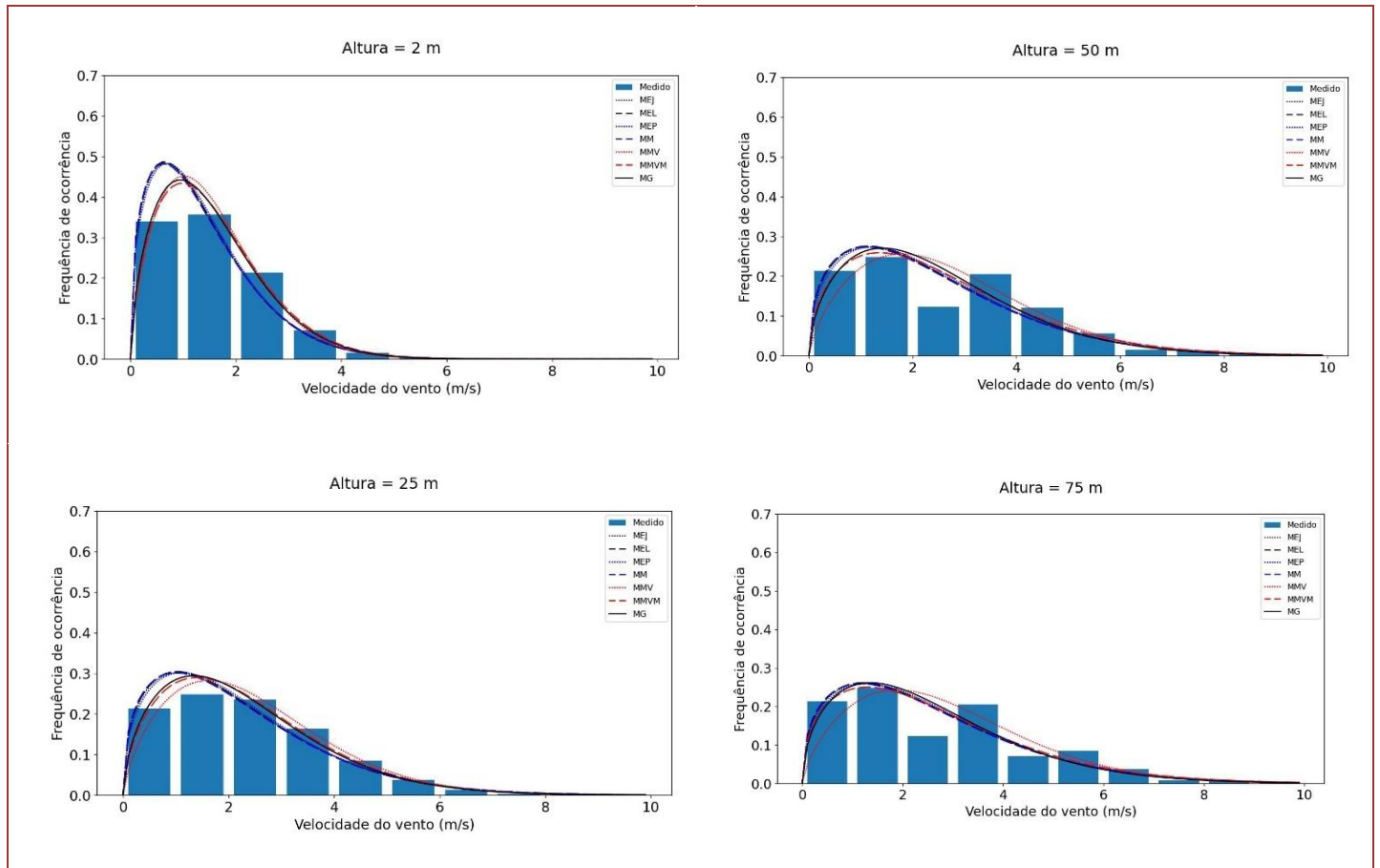
Figura 3 – Frequência de ocorrência de vento em função da direção de incidência, no período 2020-2022, em Caraúbas – RN, nas alturas de 2 m e 75 m em relação ao solo



Ainda na Figura 3, observa-se que os valores de velocidade para a altura extrapolada de 75 m são relativamente maiores, como era esperado, chegando a atingir valores na faixa 16-18 m/s. Porém, mesmo nessa altura, a frequência com que ventos com velocidade acima de 7 m/s incidem das direções predominantes não ultrapassam 10% do tempo, confirmando a inviabilidade para aproveitamento eólico, mesmo em alturas maiores, como já havia sido discutido anteriormente. Como a extrapolação não capta as mudanças de direção que ocorrem em alturas maiores devido ao menor atrito que existe do vento com o solo, não se pode afirmar nada sobre as direções predominantes de incidência do vento na altura de 75 m.

A Figura 4 apresenta a distribuição de frequência de ocorrência do vento a partir dos dados medidos pela estação de monitoramento remoto, para as quatro alturas analisadas. Para todas, o bin de velocidade predominante é o de 2 m/s. Para a altura de 2m, verifica-se uma predominância de ocorrência de ventos de até 2 m/s, como já tinha sido identificado na rosa dos ventos apresentada na Figura 3. O vento para esta altura, ocorre nesse intervalo de velocidades em aproximadamente 70% do tempo. Para a altura de 25 m, o intervalo se estende até os 3 m/s, concentrando o vento nessa faixa também em aproximadamente 70% do tempo. Quando analisadas as distribuições para as alturas extrapoladas de 50 m e 75 m, observa-se que a frequência de ocorrência de vento com 4 m/s supera a de 3 m/s. Possivelmente, isso ocorreu em decorrência de erros de leitura do anemômetro da marca HOBO, modelo S-WSA-M003, utilizado na estação de monitoramento remoto que apresenta resolução de 0,38 m/s, com erro de $\pm 1,1$ m/s ou 4% da leitura, o que for maior.

Figura 4 – Distribuição de probabilidade de ocorrência da velocidade do vento real e de Weibull, no período 2020-2022, em Caraúbas – RN, nas alturas de 2 m, 25 m, 50 m e 75 m em relação ao solo



Além das características já mencionadas, foi determinado para as quatro alturas a velocidade média do vento $\bar{v}$, o desvio-padrão σ , e a densidade de potência DP . A Tabela 1 sintetiza essas características. Foi considerado um valor de ρ igual a $1,2922 \text{ kg/m}^3$.

Tabela 1 – Características do vento no período 2020-2022, em Caraúbas - RN

Altura (m)	$\bar{v}$ (m/s)	σ (m/s)	DP (W/m ²)
2	1,39	1,00	10,37
25	2,22	1,60	29,29
50	2,45	1,77	39,98
75	2,59	1,87	45,72

5.2. ANÁLISE DE ADERÊNCIA

Utilizando-se da Eq. (3) a Eq. (18) foi possível determinar os parâmetros de forma (k) e escala (c) da distribuição de Weibull a partir das sete metodologias descritas anteriormente, como mostrado na Tabela 2. Esses parâmetros foram utilizados para construir as curvas de distribuições de probabilidade de ocorrência de Weibull, apresentadas na Figura 4.

Tabela 2 – Parâmetros de forma (k) e escala (c) da função de distribuição de probabilidade de Weibull, para as alturas de 2 m, 25 m, 50 m e 75 m

Altura (m)	Parâmetro de Weibull	Método						
		MEJ	MEL	MEP	MM	MMV	MMVM	MG
2	k	1,4230	1,4230	1,4579	1,4023	1,6900	1,6300	1,6136
	c	1,5270	1,5136	1,5323	1,5236	1,7239	1,7646	1,7256
25	k	1,4230	1,4230	1,4579	1,4023	1,6900	1,5900	1,5668
	c	2,4453	2,4239	2,4538	2,4399	2,7606	2,6202	2,5670
50	k	1,4230	1,4230	1,4579	1,4023	1,6900	1,4900	1,5474
	c	2,6973	2,6737	2,7066	2,6914	3,0451	2,8731	2,7810
75	k	1,4230	1,4230	1,4579	1,4023	1,6900	1,4400	1,4951
	c	2,8448	2,8198	2,8546	2,8385	3,2116	2,9506	2,8476

A aderência de cada uma das curvas de distribuição de Weibull com a distribuição de probabilidade de ocorrência real da velocidade do vento foi analisada utilizando-se os três parâmetros estatísticos descritos na Eq. (19) a Eq. (22). A Tabela 3 sintetiza os resultados encontrados.

Tabela 3 – Parâmetros de forma (k) e escala (c) da função de distribuição de probabilidade de Weibull, para as alturas de 2 m, 25 m, 50 m e 75 m

Altura (m)	Parâmetro Estatístico	Método						
		MEJ	MEL	MEP	MM	MMV	MMVM	MG
2	KS	0,0815	0,0854	0,0752	0,0852	0,0264	0,0130	0,0216
	RMSE	0,0623	0,0634	0,0629	0,0622	0,0505	0,0459	0,0491
	R ²	0,7893	0,7821	0,7861	0,7907	0,8621	0,8862	0,8692
25	KS	0,0659	0,0703	0,0616	0,0685	0,0494	0,0195	0,0292
	RMSE	0,0328	0,0336	0,0322	0,0332	0,0182	0,0247	0,0270
	R ²	0,8684	0,8623	0,8730	0,8654	0,9596	0,9253	0,9107
50	KS	0,1022	0,1067	0,1017	0,1025	0,0741	0,0704	0,0898
	RMSE	0,0237	0,0332	0,0326	0,0328	0,0279	0,0292	0,0315
	R ²	0,8487	0,8437	0,8496	0,8478	0,8900	0,8789	0,8600
75	KS	0,0745	0,0791	0,0734	0,0753	0,1004	0,0555	0,0754
	RMSE	0,0284	0,0288	0,0282	0,0285	0,0259	0,0268	0,0285
	R ²	0,8782	0,8747	0,8792	0,8772	0,8987	0,8912	0,8770

Pode-se observar na Figura 4 que, qualitativamente, para a altura de 2 m, todas as distribuições de Weibull analisadas superestimaram a frequência de ocorrência para as velocidades que mais ocorrem (1 m/s e 2 m/s). Para as velocidades extrapoladas essas superestimativas forma reduzidas, principalmente para 50 m e 75 m.

Outra observação qualitativa que pode ser feita a partir da Figura 4, para a altura de 2 m, é que dois grupos bem distintos de formato das curvas de distribuição podem ser notados. O primeiro, composto pelos métodos MEJ, MEL, MEP e MM, apresenta valor máximo de ocorrência próximo de 50% e em valores de velocidade mais baixo que o segundo grupo, composto pelos métodos MMV, MMVM e MG, com valor máximo de aproximadamente 45%. Para as outras alturas, a separação em dois grupos fica menos evidente. Apenas o método MMV apresenta comportamento mais diferente, com o valor máximo de frequência de ocorrência do vento acontecendo em valores de velocidade maior que os demais.

A partir da análise dos parâmetros estatísticos, a observação qualitativa da separação em dois grupos distintos fica mais evidente. Analisando os valores de KS , dá para constatar que os métodos MMV, MMVM e MG foram os que obtiveram melhores resultados, principalmente para a altura de 2 m, tendo em vista os menores valores encontrados. A exceção foi na altura de 75 m, onde os métodos MMV e MG tiveram resultados semelhante ou pior que os demais métodos. Vale destacar, que para todos os métodos e em todas as alturas, os valores de KS ficaram abaixo do valor crítico para uma confiança de 95%, descrito na Eq. (20). Dentre todos os métodos avaliados o que mostrou melhor aderência com a distribuição real para as quatro alturas foi o MMVM, obtendo sempre o menor valor entre os sete métodos. Já o que apresentou piores resultados foi o MEL. Apesar de alguns métodos apresentarem maior aderência que outros, nenhum deles apresentou resultados que permitissem afirmar que o método resulta em parâmetros de Weibull que não representam bem a distribuição real.

Considerando o parâmetro $RMSE$, os resultados entre todos os métodos foram mais parecidos entre si. Apenas para as alturas de 2 m e 25 m os métodos MMV e MMVM apresentam resultados levemente melhores que os demais. Entretanto, a partir dos resultados pode-se considerar que todos representam bem a distribuição real. Constatação parecida pode ser feita a partir dos resultados obtidos com o parâmetro R^2 , tanto em termo dos métodos que apresentaram melhores resultados, quanto na capacidade de todos os métodos em representar bem a distribuição real da probabilidade de ocorrência da velocidade do vento.

6. CONCLUSÕES

Diante dos resultados apresentado, algumas conclusões podem ser feitas. Com relação às características do vento no local estudado, pode-se afirmar que as médias de velocidade são baixas, com reduzida densidade de potência, não sendo interessante para aproveitamento eólico. Entretanto, apesar do baixo potencial eólico, o vento local apresenta uma característica interessante que é a existência de direções de incidência bem definidas e regulares.

No que diz respeito às distribuições de probabilidade de ocorrência de Weibull analisadas a partir dos três parâmetros estatísticos definidos, pode-se fazer algumas afirmações. A primeira, é que todos os sete métodos estudados conseguem representar de forma satisfatória a distribuição real da frequência de ocorrência da velocidade do vento, reforçando a empregabilidade da distribuição de Weibull nesse tipo de aplicação. A segunda é que, apesar da boa aderência geral, pode-se dividir os sete métodos em dois grupos: o formado pelos métodos MEJ, MEL, MEP e MM, que apresentaram resultados levemente piores; e o formado pelos métodos MMV, MMVM e MG, que apresentaram resultados levemente superiores. E por fim, a terceira afirmação é que, apesar da boa aderência geral, o método que, consistentemente, apresentou melhores resultados para o local estudado nas quatro alturas foi o MMVM.

REFERÊNCIAS

- [1] Akdag S. A, Dinler A. A., 2009. A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications, *Energy Convers Manage*, vol. 50, n. 7, pp. 1761-1766, doi: 10.1016/j.enconman.2009.03.020.
- [2] Andrade, C. F., Maia Neto, H. F., Rocha, P. A. C., Silva, M. E. V., 2014. An efficiency comparison of numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy applications: A new approach

applied to the northeast region of Brazil, *Energy Conversion and Management*, vol. 86, pp. 801-808, doi: 10.1016/j.enconman.2014.06.046.

- [3] Bañuelos-Ruedas, F., Angeles-Camacho, C., Rios-Marcuello, S., 2010. Analysis and validation of the methodology used in the extrapolation of wind speed data at different heights, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 2383-2391, doi: 10.1016/j.rser.2010.05.001.
- [4] Cai, W., Borlace, S., Lengaigne, M., Rensch, P., Collins, M., Vecchi, G., Timmermann, A., Santoso, A., McPhaden, M. J. Wu, L., England, M. H., Wang, G., Guilyardi, E., Jin, F. F., 2014. Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming, *Nature Climate Change*, vol. 4, pp. 111-116, doi: 10.1038/nclimate2100.
- [5] Chang, T. P., 2011. Performance comparison of six numerical methods in estimating Weibull parameters for wind energy application, *Applied Energy*, vol. 88, pp. 272-282, doi: 10.1016/j.apenergy.2010.06.018.
- [6] Chiodo, E. Lauria, D., 2009. Analytical study of different probability distributions for wind speed related to power statistics, *2009 International Conference on Clean Electrical Power*, Capri, Italy, pp. 733-738. doi: 10.1109/ICCEP.2009.5211970.
- [7] GWEC, 2023. Global Wind Report 2023, Global Wind Energy Council.
- [8] Hussain, I., Haider, A., Ullah, Z., Russo, M., Casolino, G. M., Azeem, B., 2003. Comparative Analysis of Eight Numerical Methods Using Weibull Distribution to Estimate Wind Power Density for Coastal Areas in Pakistan, *Energies*, vol. 16, n. 3, doi: 10.3390/en16031515.
- [9] Jain, P. (2011). *Wind Energy Engineering*, The McGraw-Hill Companies.
- [10] Justus, C. G., Hargraves, W. R., Mikhail, A., Graber, D., 1978. Methods for estimating wind speed frequency distributions, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 17, n. 3, pp. 350-353.
- [11] Justus C. G., Mikhail A., 1976. Height variation of wind speed and wind distribution statistics, *Geophysical Research Letters* vol. 3, n. 5, pp. 261-264, doi: 10.1029/GL003i005p00261.
- [12] Kantar, Y. M., Usta, I., 2015. Analysis of the upper-truncated Weibull distribution for wind speed, *Energy Conversion and Management*, vol. 96, pp. 81-88, doi: 10.1016/j.enconman.2015.02.063.
- [13] Koholé, Y. W., Djiela, R. H. Y., Fohagui, F. C. V., Ghislain, T., 2023. Comparative study of thirteen numerical methods for evaluating Weibull parameters for solar energy generation at ten selected locations in Cameroon. *Cleaner Energy Systems*, vol. 4, doi: 10.1016/j.cles.2022.100047.
- [14] Lysen, E. H., 1982. *Introduction to wind energy*, Consultancy services wind energy developing countries (CWD).
- [15] Nielsen, M. A., 2011. *Parameter Estimation for the two-parameter Weibull Distribution*, Dissertation, Department of Statistics, Brigham Young University, Provo, UT, USA.
- [16] Oliveira, A. M. A., 2023. *Modelagem probabilística dos insumos da geração fotovoltaica no alto sertão potiguar*, Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharias, UFERSA, Caraúbas - RN.
- [17] Oliveira Filho, O. D. Q., Araújo, A. M., Borges, W. F. A., Silva, A. A. C., Bezerra, C. C. A., Fernandes, E. C. R., Rocha, E. J. F., Rocha, G. J. A. M., Andrade, L. I., Ribeiro, D. G., 2018. Analysis of Weibull parameters for wind power Generation, *Engenharia Térmica (Thermal Engineering)*, nol. 17, n. 1, pp. 09-13, doi: 10.5380/reterm.v17i1.62252.
- [18] REN21, 2023. *Renewables 2023 Global Status Report Collection - Global Overview*, Paris: REN21 Secretariat. ISBN: 978-3-948393-11-3.
- [19] Rocha, P. A. C., Sousa, R. C., Andrade, C. F., Silva, M. E. V., 2012. Comparison of seven numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy generation in the northeast region of Brazil, *Applied Energy*, vol. 89, n. 1, pp. 395-400, doi: 10.1016/j.apenergy.2011.08.003.
- [20] Saeed, M. K., Salam, A., Rehman, A. U., Abid, M. A. S., 2019. Comparison of six different methods of Weibull distribution for wind power assessment: A case study for a site in the Northern region of Pakistan, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 36, doi: 10.1016/j.seta.2019.100541.

[21] Seguro J. V., Lambert, T. W., 2000. Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 85 n. 1, pp. 75–84, doi: 10.1016/S0167-6105(99)00122-1.

[22] Stevens, M. J., Smulders, P. T., 1979. The estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy utilization purposes, *Wind Engineering*, vol. 3, n. 2. Pp. 132–145.

Capítulo 12

Análise de regras de despacho aplicadas em arranjos físicos fractais

Shih Yung Chin

Resumo: Este artigo tem como objetivo analisar as diferentes estratégias de ordenação de produtos no desempenho de arranjos físicos fractais. Deseja-se verificar se o desempenho de LPT+NEH pode ser prejudicado com a formação de células virtuais dentro de células fractais, fazendo com que tanto os tempos de esperas de lotes para iniciar o processamento em cada célula virtual quanto os tempos de espera de peças dentro de cada uma das células acabem prejudicando o *makespan*. Para conduzir o estudo, desenvolveu-se um modelo computacional para a coleta de *makespans*, de tempos de espera de lotes e de tempos de esperas de peças. O LPT+NEH mostrou-se ter desempenho superior (*makespan*) aos demais critérios. A razão disso é que foi o único critério capaz de reduzir os tempos de espera considerados neste estudo. O estudo aponta que o LPT+NEH tem eficiência ainda melhor ao trabalhar com arranjos físicos de pequeno porte. O estudo também mostra que de uma forma geral, aumentar o número de células fractais melhora o *makespan*.

1. INTRODUÇÃO

Devido à aspectos turbulentos de mercado, em que há forte competição entre empresas, Gunasekaran (1998) afirmou que o ciclo de vida dos produtos (peças ou jobs) tem encurtado, obrigando as empresas a desenvolver sempre produtos novos em pouco tempo, de qualidade, a custo reduzido. O processo produtivo deve então ser capaz de responder rapidamente a essas mudanças de comportamento de mercado, introduzindo novas maneiras de planejar e controlar a produção.

Entretanto, fazer alterações constantes de recursos produtivos em chão de fábrica é uma prática que, dependendo da situação, pode tornar economicamente inviável. É importante que o chão de fábrica seja robusto para absorver as variações de tipos de produtos, de demandas (Benjaafar & Sheikhzadeh, 2000).

Para Saad & Lassila (2004) está claro que os arranjos físicos tradicionais são incapazes de atender a essas novas tendências de mercado. Foi nesse contexto que os arranjos físicos fractais foram propostos. De acordo com Askin et al. (1999), este tipo de arranjo físico é uma extensão de arranjo físico celular tradicional, com a diferença que neste todas as células possuem todos os tipos de máquinas, tornando esse novo sistema de produção muito flexível e com capacidade responsiva muito grande ao mercado. Desde então estão sendo conduzidas pesquisas sobre como obter este tipo de arranjo físico.

O primeiro autor a usar o termo fractal na manufatura foi Warnecke (1993), com a ideia de mostrar que cada unidade produtiva (unidade fractal) se repete entre elas. As unidades fractais possuem exatamente os mesmos tipos de máquinas, porém com possibilidades de quantidades distintas de cada tipo.

A primeira pesquisa que trata do desenvolvimento de um arranjo físico fractal pode ser vista em Venkatadri et al. (1997). Na abordagem desses autores, considerou-se a questão a capacidade produtiva de cada uma das máquinas, e onde cada uma delas deve estar de modo a otimizar o deslocamento dos produtos entre as células fractais como um todo.

Askin et al. (1999) conduziu um estudo de desempenho considerando que todas as células fractais são idênticas, porém com máquinas não dedicadas para produzir um determinado tipo de produto (não há célula virtual). Em comparação com o arranjo físico distribuído e funcional, os autores mostraram que o tempo de resposta é melhor, além de otimizar o deslocamento. Esses autores ainda afirmaram que as células fractais, além de multifuncionais, são autônomas, sem depender uma das outras, pois a ideia é que, quando algum produto for a ela direcionada, todas as operações são executadas, sem depender de alguma máquina de outra célula. No entanto, conforme alertado por Venkatadri et al. (1997), caso as células fractais estiverem trabalhando em cooperação uma com as outras, o posicionamento de cada célula fractal no espaço disponível deve ser analisado, devido a questões de distância percorrida.

Montreuil et al. (1999) considerou na análise duas situações. A primeira é quando todas as células fractais são idênticas (em tipos e em quantidade) e a segunda, quando são diferentes. Os autores concluíram que quando se trabalha com células idênticas, a eficiência é a mesma. Por outro, há incremento de deslocamento entre as células fractais.

No trabalho de Saad & Lassila (2004), os autores analisaram os seguintes critérios: distribuição de produtos (balanceada e desbalanceada), células idênticas e não idênticas, rota de produto (autônomo) ou cooperativo, layout externo otimizado (posicionamento de células fractais no chão de fábrica, posicionamento interno (posição ótima de equipamentos dentro da célula), e como resultado, resultou em sete combinações a serem

analisadas. Os autores concluíram que há uma correlação negativa entre a quantidade total de máquinas e a movimentação de materiais.

Shih & Gonçalves Filho (2004) propuseram uma metodologia baseada em similaridade para obter o melhor posicionamento de cada uma das células fractais visando a otimização de deslocamento de produtos entre elas, assumindo que as células possuem diferentes tipos de máquinas. A motivação foi que, a depender da situação, as empresas podem não ter de prontidão todos os tipos possíveis de máquinas para a formação de arranjo físico fractal, devido ao custo. Portanto, haveria necessidade de posicionar apropriadamente as células fractais no chão de fábrica para cobrir as deficiências da outra.

Elaskari & Venkatadri (2022) apresentaram um estudo, cuja essência é analisar se as células tradicionais estão correlacionadas com as células fractais. Para a hipótese analisada, os autores buscaram analisar inicialmente as deficiências que uma célula tradicional apresenta, que é quando em virtude de uma demanda inesperada, recorre-se a outra célula. Então os autores propuseram uma célula fractal inserida no centro do layout celular tradicional com o objetivo de absorver essa demanda inesperada, chamada CE célula central backup. Eles analisaram o custo de aquisição de máquinas e custo de produção. Os autores argumentaram que conforme mais células centrais são adicionadas, mais se parecerá com arranjo físico fractal, ou parecido com célula tradicional caso contrário. Em outras palavras, o que os autores quiseram dizer é que, um meio termo entre células tradicionais e células fractais já é suficiente e economicamente viável.

Shih (2024) apresentou um estudo considerando a situação em que, se há interrupção de produção em virtude das diferentes políticas de manutenção, como isso afetaria o desempenho de arranjos físicos fractais. O autor simulou para diferentes quantidades de células fractais, e analisou os impactos no desempenho quanto à decisão de os lotes aguardarem na célula fractal até concluir a manutenção (o que aumentaria o makespan) ou mover o lote à outra célula antes que a manutenção das máquinas da célula fractal de origem se encerre (o que aumentaria o deslocamento).

Nos artigos pesquisados, percebe-se que os autores ainda não abordaram a questão da ordenação de produtos em estudo de arranjos físicos fractais sendo, portanto, a contribuição dessa pesquisa. Neste estudo deseja-se analisar, para uma determinada quantidade de cada um dos tipos de máquinas, qual é o número de células fractais mais apropriado e qual critério de ordenação de produtos que melhor reduza o tempo de makespan, o tempo médio de espera de lotes de matérias primas de cada tipo de produto, e o tempo médio de espera de cada unidade produzida.

Este artigo está estruturado da seguinte maneira. Na seção 2 apresentamos a revisão sobre ordenação de produtos para flowshop scheduling problem (PFSP), que é aquela situação que todos os produtos requisitam as mesmas máquinas, e seguem a mesma sequência operacional. Isso porque estamos lidando com células virtuais, as quais imitam fluxo unitário e contínuo de produção. Na seção 3 apresentamos as funções objetivo bem como as restrições. Na seção 4 apresentamos algumas ilustrações para ajudar no entendimento das funções objetivo e é a partir das ilustrações que construímos o fluxograma usado na pesquisa que aparece na seção 5. Ainda na seção 5, apresentamos os materiais utilizados para conduzir o estudo. Definimos os dados de entrada ao modelo de simulação, que podem ser vistos na seção 6. Na seção 7 apresentamos os resultados obtidos com a simulação para os três tamanhos considerados de arranjos físicos fractais, aplicamos análise estatística e discutimos. E por fim, na seção 8 apresentamos a conclusão e proposta para futuros trabalhos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O termo “Flowshop scheduling problem” é usado quando os produtos devem ser processados exatamente nas mesmas máquinas e na mesma sequência operacional. Quando é do tipo permutacional, significa que em cada máquina a ordem em que os produtos são executados nela é a mesma. Esse tipo de sistema é apropriado quando se deseja reduzir custo de produção, pois o produto passa de um em um entre as máquinas. Yang & Wang (2001) comentaram que é difícil definir uma programação ótima, principalmente em se tratando de grande quantidade de máquinas. Desse modo, grande parte dos procedimentos estão voltados na permutação de ordem de entrada de peças. Zhang et al. (2023) mencionaram, que entre as regras de ordenação para despachar o produto para iniciar a produção são: any simple dispatching rules, including the shortest processing time (SPT), longest processing time (LPT), earliest due date (EDD) and first come, first served (FCFS) rules, are used directly for job scheduling. Há também First In First Out, Last in First Out (LIFO), Randômico, NEH entre outros. Para se trabalhar com essas regras, existem variáveis a considerar como os tempos de processamento, os instantes de chegada do pedido, tempo remanescente para concluir as operações do produto e o prazo de entrega.

Kalczynski and Kamburowski (2009) relatam que se o objetivo é minimizar o makespan, o algoritmo NEH é o mais indicado. Há também outros medidores de desempenho além do makespan. Por exemplo, Liu, Jin & Price (2016) consideraram o makespan e o tempo de ociosidade. Proposto por Nawaz et al. (1983), o NEH é composto por basicamente duas etapas. A primeira trata de ordenar os Jobs (produtos) em lista de acordo com os tempos de processamento (do maior ao menor tempo). À partir de dois Jobs do topo da lista, escolhe-se o próximo job imediatamente inferior a esses dois primeiros Jobs e insere-o nas diferentes posições possíveis em relação aos dois Jobs (antes, entre e depois). Para cada posição do job inserido, calcula-se o makespan. Ao comparar os makespans, aquela posição que resultar no menor makespan é a melhor posição do job a ser inserido. Repete-se o mesmo procedimento aos demais Jobs da lista ainda não inseridos.

Desde então, versões melhoradas da versão clássica de NEH foram apresentados na literatura. Puka et al. (2021) propuseram uma versão adaptada de NEH, batizada de NEH+. Diferente de NEH, em que para uma determinada listagem a ordenação de Jobs é construída alocando todas as operações, os autores aqui propõem alocar parcialmente os Jobs e alocar o restante com parte dos Jobs já alocados. Os autores puderam concluir que isso ajuda a minimizar o makespan.

Ruiz & Maroto (2005) conduziram um estudo comparativo dos algoritmos construtivos em relação ao clássico NEH e concluíram que para as instâncias de Taillard, o método clássico foi o que apresentou melhores resultados.

Puka et al. (2022) comentam que ainda haviam poucos estudos em caso de empate entre os tempos de processamento. Os autores perceberam que sim pode afetar no makespan, mas para o estudo de pequeno porte que eles conduziram, só foi possível concluir que apenas uma porção de resultados foi melhor que o NEH clássico.

Desde então, melhorias foram sugeridas ao algoritmo NEH para lidar com despacho quando há empate envolvido, como é o caso de Liu & Price (2017a).

Kalczynski and Kamburowski (2008) e Kalczynski and Kamburowski (2009) propuseram uma versão adaptada de NEH atribuindo pesos aos tempos de processamento para a ordenação dos Jobs.

Liu, Jin and Price (2017b) apresentaram uma regra de despacho considerando a situação de pedidos extras para match-up and real-time (MR) strategy também propondo atribuir pesos aos tempos de processamento.

Zhang et al. (2023) argumentam que a posição onde cada peça (job) se encontra na ordenação não deve ser como único critério, mas sim, deve-se fazer uma análise interrelacional de similaridade das peças a serem ordenadas. Foi então que esses autores propuseram uma versão adaptada de NEH.

Sharma et al. (2021) propuseram um estudo analisando o empate quando as tarefas já tiveram parte das operações parcialmente alocadas em máquinas. Os autores observaram que os resultados obtidos são melhores que os obtidos por Taillard (1990).

Para todos os artigos pesquisados, assume-se que os produtos seguem exatamente a mesma sequência de operação, usando as mesmas máquinas, porém com durações diferentes. Propusemos analisar diferentes produtos, que utilizam sequências de máquinas totalmente diferentes uma da outra. Identificamos para cada produto o melhor grupo de máquinas que será responsável pelas operações (célula virtual) dentro de cada célula fractal. Assim que concluir as operações, as máquinas do grupo poderão ser utilizadas para formar outras células virtuais para executar operações em outros produtos.

Em suma, temos a situação de flow shop mas cada tipo de peça apresenta um roteiro totalmente diferente do outro. Não é do tipo permutacional, porque cada máquina pode estar processando diferentes produtos. Temos a situação de máquinas paralelas porque iremos lidar com réplicas de um mesmo tipo de máquina, que embora são capazes de executarem as mesmas operações, podem não ser usadas. Isso porque a máquina pode não fazer parte da célula virtual.

3. FORMULAÇÃO DA FUNÇÃO OBJETIVO

A equação (1) tem como objetivo identificar, para a ordem estabelecida de acordo com os critérios de ordenação, o conjunto de máquinas da célula virtual de cada um dos produtos e calcular a distância entre as máquinas. Como a célula virtual imita uma linha clássica de produção, com o uso de fluxo unitário, isto é, o produto passando de um em um entre as operações, então para garantir que o fluxo unitário seja executado adequadamente, deve-se garantir que o conjunto de máquinas responsável por cada etapa do produto esteja o mais próximo possível entre elas. Desse modo, estabeleceu-se então a primeira função objetivo (2), que trata de alterar as posições de máquinas em cada célula fractal k capaz de minimizar a soma das distâncias de todas as células fractais.

Para cada célula fractal k , as duas funções objetivo (1) e (2) são executadas:

$$\left. \begin{array}{l} \text{If } I_p > 1 \text{ then } d_{\text{virtual cell } p} = \{\sum_{i=2}^{I_p} |x_i - x_{i-1}| + |y_i - y_{i-1}|\} \\ \text{If } I_p = 1 \text{ then } d_{\text{virtual cell } p} = 0 \end{array} \right\} \quad (1)$$

$$\min \sum_{p=1}^P D_p \leftarrow D_p + d_{\text{virtual cell } p} \quad (2)$$

As restrições são definidas como se segue:

$D_p \geq 0$, sendo que D_p inicia-se com zero

$X > 0$

$$x \leq X$$

$$y > 0$$

$$y \leq Y$$

$$P > 0$$

$$I_p \geq 1$$

in which:

$p = p^{th}$ product

$p \leq P$ = types of products

$i \leq I_p$ = number of operations of product type p

i = counts the number of operations of product p

x = Horizontal cartesian coordinate of machine responsible for executing operation i

y = Vertical cartesian coordinate of machine responsible for executing operation i

X e Y = tamanho do arranjo físico fractal, nas coordenadas cartesianas horizontal e vertical, respectivamente.

Essas células virtuais serão mantidas fixas para a análise de todas as regras de ordenação. A segunda função objetivo (3) consiste em verificar o maior makespan entre todas as máquinas pertencentes à célula fractal k . Isso porque a produção de todas as unidades de produto alocadas na célula tão somente é concluída quando a última peça terminar de receber a última operação.

$$\text{Makespan of fractal cell } k = \max \{ \text{makespan}_{m=1 \rightarrow M} \} \quad (3)$$

Para obter os makespans das máquinas, deve-se fazer a alocação das durações das operações. A alocação de tarefa p em máquina requisitada m pode ser representada através de (4):

$$\text{Makespan}_m \leftarrow \text{Makespan}_m + \text{Duration}_{pi} + t_m \quad (4)$$

em que:

m corresponde à máquina pertencente à célula virtual responsável pela operação i do produto p na célula fractal k ;

t_m corresponde ao tempo que a máquina permaneceu ociosa, se houver. Caso contrário, vale zero.

Makespan_m inicia-se com valor zero para todas unidades (réplicas) de cada tipo de máquina.

4. EXEMPLIFICAÇÃO

Para ajudar no entendimento, segue um exemplo. Suponha que a lista ordenada seja conforme mostrada na Tabela 1. Tomemos o produto Z como ilustração. Na primeira linha estão representados os tipos usados de máquinas para executar operações na matéria

prima de Z. Ao todo são necessárias quatro operações em quatro máquinas distintas. Na coluna seguinte estão os tempos necessários em cada operação. A primeira operação ocorre na máquina tipo 3, cujo tempo de operação em cada unidade de matéria prima é de 5 segundos. A quarta coluna refere-se ao número de lotes e por fim, na última coluna, está o número de unidades de matérias primas presentes em cada lote (relação de uma unidade de matéria prima para uma unidade de produto). Portanto, ao concluir todas as operações necessárias, o número total de unidades obtidas com as operações no produto Z serão 4 unidades.

Tabela 1: Mostra os tipos de produtos, as sequencias e os tempos de operações e as quantidades a serem produzidas pela célula fractal k

Tipo de Produto	Sequência de operação	Tempo de operação (em segundos)	Número de lotes	Número de unidades de matéria-prima no lote
Z	3→2→1→4	5→10→3→8	2	2
X	1→2	4→8	1	2
W	4	5	2	1
Y	1	2	2	2

Na Figura 1 mostra, no eixo das ordenadas, as máquinas utilizadas. Por exemplo, se for 1.2, significa que a máquina utilizada é máquina tipo 1, de segunda réplica. Embora as réplicas são exatamente iguais, é importante essa diferenciação, já que estamos lidando com células virtuais.

Realizando-se a alocação dos tempos de cada operação em gráfico de Gantt, ver Figura 1, podemos obter algumas informações relevantes sobre os tempos de espera de lotes, bem como os tempos de espera de cada unidade de cada tipo de produto. Percebe-se que, quando um produto requisitar várias operações, o tempo de espera do produto em ambiente de produção não é simplesmente o tempo de espera do lote de matéria prima em fila, mas as esperas em operações posteriores aguardando para receber algum processamento em máquina.

Produto 1

- Espera do primeiro lote é igual a nulo;
- O tempo de espera da primeira unidade de matéria prima do primeiro lote é nulo;
- O tempo de espera da segunda unidade de matéria prima é 5 unidades de tempo para iniciar a sua primeira operação, mais o tempo que permaneceu em fila para iniciar a segunda operação na máquina 2.1, cuja espera é de 5 unidades de tempo, totalizando 10 unidades de tempo;
- O tempo de espera do segundo lote do produto 1 é de 10 unidades de tempo;
- O tempo de espera da primeira unidade de matéria prima do segundo lote é de 10 unidades de tempo, mais 10 unidades de tempo aguardando para receber a segunda operação na máquina 2.1, totalizando 20 unidades de tempo;
- A segunda unidade de matéria prima do segundo lote esperou 15 unidades de tempo para receber a primeira operação na máquina 3.1, mais 15 unidades de tempo para receber a segunda operação na máquina 2.1, totalizando 30 unidades de tempo.

Produto 2

- O primeiro lote do produto 2 teve espera de 48 unidades de tempo;
- Assim, a primeira unidade de matéria prima espera do primeiro lote é de 48 unidades de tempo para receber a primeira operação na máquina 1.1.
- A segunda unidade de matéria prima do primeiro lote aguarda 52 unidades tempo em fila mais 4 unidades de tempo para receber a segunda operação na máquina 2.1, totalizando 56 unidades de tempo.

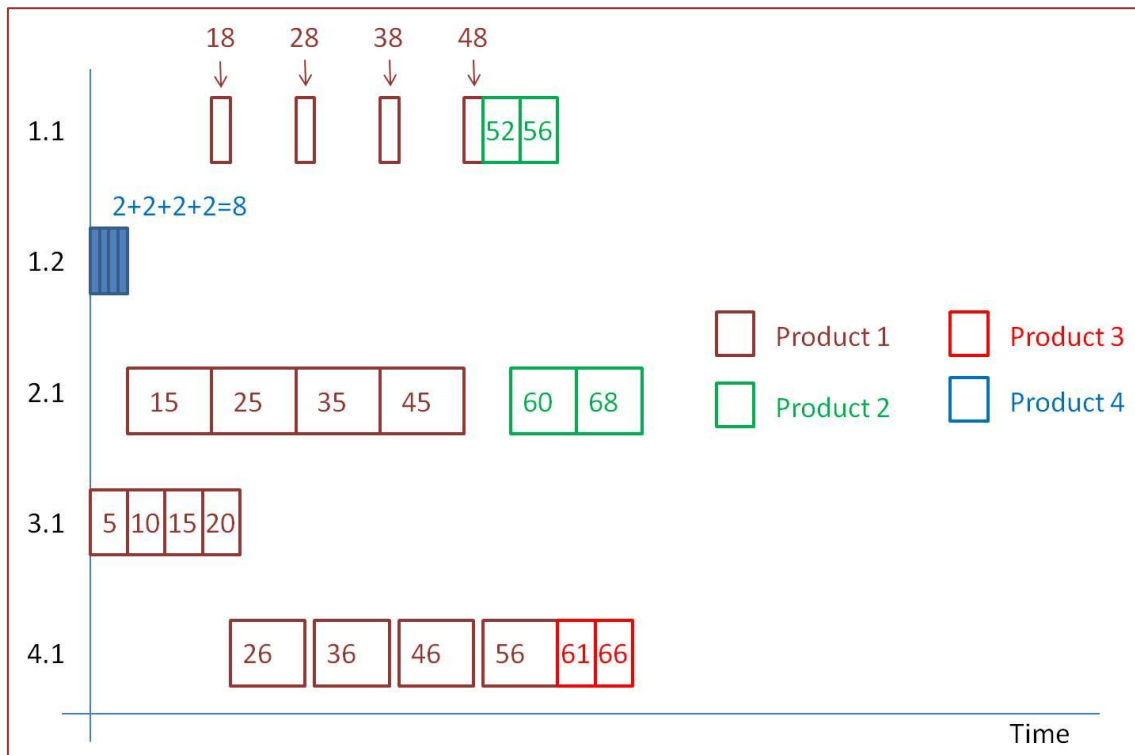
Produto 3

- Observando o gráfico de Gantt, o primeiro lote do produto 3 aguardou 56 unidades de tempo em fila;
- Podemos então afirmar que a espera da primeira unidade de matéria prima do primeiro lote é de 56 unidades de tempo;
- o tempo de espera do segundo lote do produto 3 é de 61 unidades de tempo;
- portanto a espera da primeira unidade de matéria prima do segundo lote é de também 61 unidades de tempo.

Produto 4

A máquina requisitada pelo produto 4 é a máquina 1. Acontece que não há célula virtual (conjunto de máquinas) para fazer o processamento de matéria-prima. De acordo com o exemplo, há duas máquinas 1.1 e 1.2 para processá-la. Na ilustração, escolheu-se aquela máquina que apresenta o menor makespan, ou seja, a máquina 1.2 por ter makespan nulo. Neste estudo, devido a questões de programação computacional, optou-se por escolher aleatoriamente uma das máquinas.

- Fazendo-se as alocações das durações das operações, vimos que o tempo de espera do primeiro lote é nulo;
- Portanto o tempo de espera da primeira unidade de matéria prima também é nulo.
- Já a segunda unidade de matéria prima do primeiro lote, aguardou 2 unidades de tempo;
- O segundo lote tem espera de 4 unidades de tempo;
- Portanto a espera da primeira unidade de matéria prima em fila também é de 4 unidades de tempo
- O tempo de espera da segunda unidade de matéria prima do segundo lote é de 6 unidades de tempo

Figura 1: Alocação das durações das operações em gráfico de Gantt

Com base na Figura 1, obtemos o último instante de cada máquina, seguido de comparação para a obtenção do makespan. Portanto, o makespan é 68 unidades de tempo.

$$\text{Makespan}_k = \text{Max}\{\text{mach 1.1}; \text{mach 1.2}; \text{mach 2.1}; \text{mach 3.1}; \text{mach 4.1}\}$$

$$\text{Makespan}_k = \text{Max}\{56; 8; 68; 20; 66\}$$

Makespan_k = 68 units of time.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Os desempenhos do arranjo físico fractal são obtidos por meio de simulação computacional. A linguagem de programação escolhida foi o Pascal por ser de fácil acesso e amplamente utilizado.

Com a exemplificação na seção anterior, podemos então construir uma metodologia, com roteiros coerentes, para a implementação computacional e assim obter os medidores de desempenho desejados, como mostrados nas Figuras 2 e 3. Na Figura 2 basicamente define as características de cada tipo de produto, quanto ao número de operações, tipo de operação, a duração de cada operação, o número de lotes e o tamanho de cada lote. É nesta etapa que as melhores células virtuais para cada tipo de produto, dentro de cada célula fractal, são definidas. Na Figura 3, visa obter os medidores de desempenho considerados neste estudo.

Figura 2: Flowchart part 1

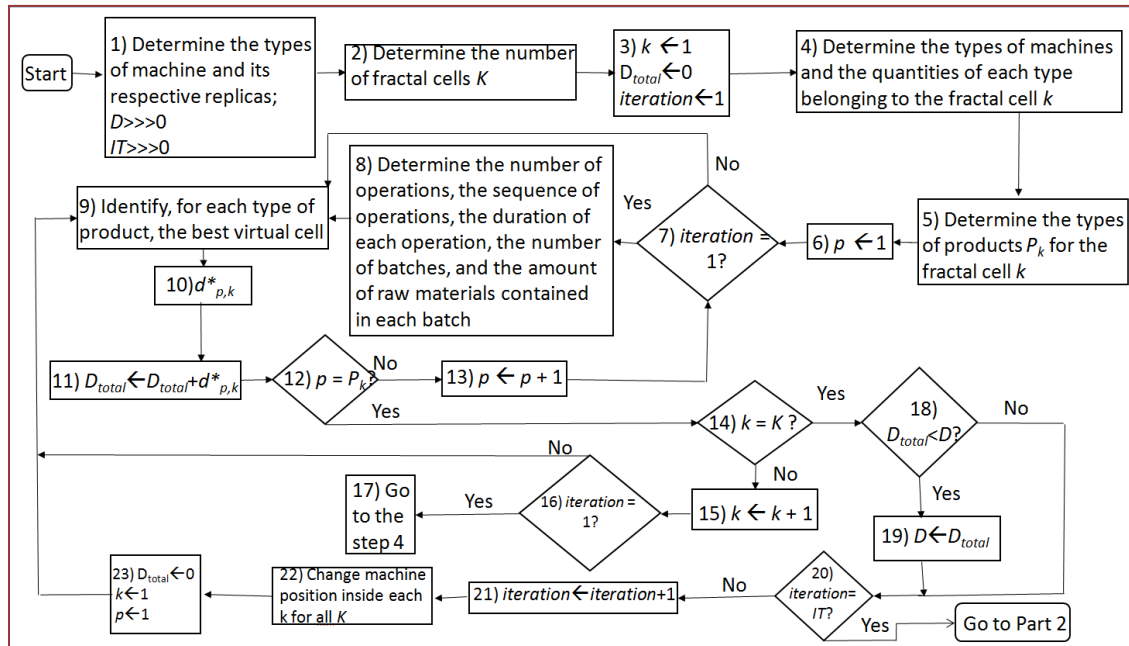
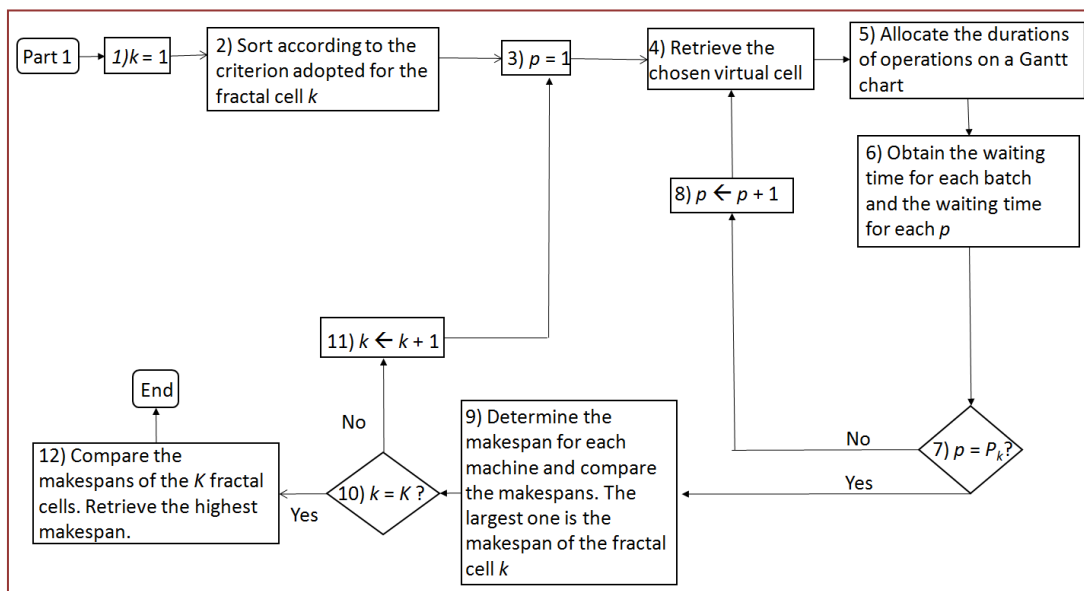


Figura 3: Flowchart part 2.



onde:

k corresponde ao contador de número de células fractais

K corresponde ao número de células fractais

p corresponde ao contador de tipos de produtos da célula fractal k

P_k corresponde aos tipos de produtos na célula fractal k

IT corresponde ao número de iterações para realizar o reposicionamento de máquinas dentro de cada célula fractal k .

6. DADOS DE ENTRADA AO MODELO DE SIMULAÇÃO

Neste estudo optou-se por utilizar as mesmas informações de Shih (2024). O autor considerou três tamanhos de arranjos físicos fractais (pequeno, médio e grande), cujos tamanhos foram:

Tabela 2: Types of machines and number of replicas for each adopted layout size

Machine type	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Total	Factory size
Quantity (number of replicas)	3	4	3	3	4	4	3	4	3	5	36	Small
	5	6	7	5	8	7	5	6	6	5	60	Average
	8	10	9	10	11	9	8	9	6	10	90	Large

(Fonte: Shih, 2024).

Montreuil et al. (1999) sugeriram que o número de células fractais deve ser de até a quantidade correspondente a menor quantidade de um dos tipos de máquina. Portanto, para os dados da Tabela 2, o número possível de células fractais para o arranjo físico de pequeno porte varia de duas a três células fractais. Para o de médio porte, o número possível de células fractais varia de duas até cinco, e por fim, para o de grande porte, varia de duas até seis.

O número de operações varia de um até cinco, o número de lotes varia de um até cinco, o tamanho de lotes varia de um até 10, as durações das operações variam de um até 15 unidades de tempo, os instantes de chegada de demanda para cada tipo de produto variam de 10 até 20 em relação anterior à chegada do anterior. Considerou-se 10 tipos possíveis de máquinas.

Neste estudo, as operações necessárias não se repetem, ou seja, uma vez que uma máquina é usada em alguma operação, posteriormente ela não será novamente usada pela mesma unidade do mesmo produto. As máquinas trabalham continuamente sem interrupções. O número adotado de interações (loops) é um valor suficientemente grande, para realizar o reposicionamento de máquinas em cada célula.

Simulou-se para uma quantidade de 60 tipos de produtos, a qual é distribuída de maneira igualitária entre as células fractais e os resultados podem ser vistos na seção 7.

7. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO E DISCUSSÕES

7.1. ARRANJO FÍSICO DE PEQUENO PORTE

A Tabela 3 mostra os resultados da simulação para arranjo físico de pequeno porte (36 máquinas, usando a configuração 6x6). Os resultados a serem coletados com a simulação foram organizados conforme os critérios de ordenação e o número utilizado de células fractais. O maior makespan das células fractais é resultado final da simulação. Observa-se que conforme aumenta o número de células fractais, melhora o desempenho de makespan, exceto no FIFO que apresenta desempenhos praticamente similares (entre usar duas e três células fractais). Destaca-se o critério LPT+NEH.

Tabela 3: Resultados da simulação para arranjo físico de pequeno porte

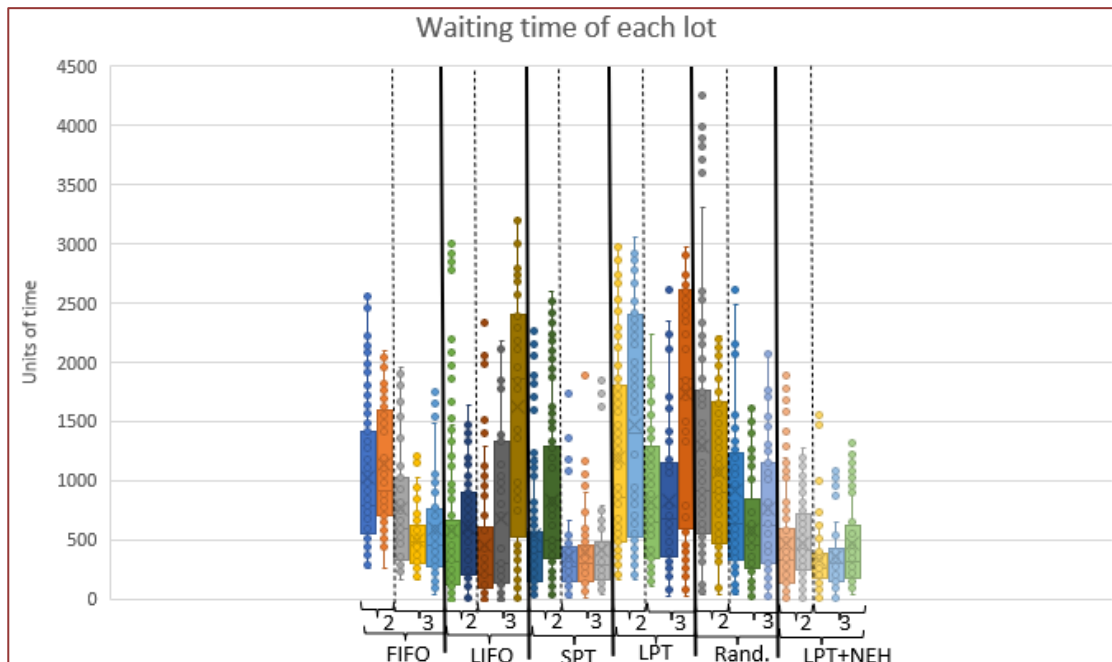
Arranjo físico de pequeno porte								
	FIFO	Makespan		LIFO	Makespan		SPT	Makespan
Cell 1	3195	3195	Cell 1	3650	3650	Cell 1	3973	3973
Cell 2	2849		Cell 2	2321		Cell 2	2984	
Cell 1	3168	3168	Cell 1	2712	3341	Cell 1	3558	3558
Cell 2	2066		Cell 2	2008		Cell 2	2238	
Cell 3	2504		Cell 3	3341		Cell 3	2538	
	LPT	Makespan		Random	Makespan		LPT+NEH	Makespan
Cell 1	3213	3213	Cell 1	4577	4577	Cell 1	2402	2402
Cell 2	3126		Cell 2	3140		Cell 2	1824	
Cell 1	2559	3005	Cell 1	3033	3033	Cell 1	1985	1985
Cell 2	1784		Cell 2	1956		Cell 2	1546	
Cell 3	3005		Cell 3	2434		Cell 3	1866	

O teste de sinais é utilizado para fazer a comparação estatística com o LPT+NEH (que foi o melhor). No H_0 , para quando não há diferença entre os tratamentos, e H_1 caso contrário. Com um nível de significância de $\alpha=5\%$, temos como valor da estatística p igual a 0.025 para todos os tratamentos em relação ao LPT+NEH. Portanto, pode-se concluir que não só o LPT+NEH apresenta o menor makespan, como em termos estatísticos, essa redução de makespan é significativa em relação aos demais tratamentos.

Também se analisou estatisticamente se a alteração na utilização de número de células fractais melhora significativamente o makespan. A um nível de significância de 5%, o cálculo do valor de p é $0.014 < 0.05$, indicando que a redução de makespan usando três células fractais é significativamente melhor que duas células.

A Figura 4 mostra os tempos de espera de cada lote para iniciar o processamento em uma das células fractais. Cada boxplot representa uma célula fractal. Por exemplo, se for 3, significa que são utilizadas três células fractais. Ainda, cada “ponto” representa um lote. No caso do FIFO, SPT, randômico e LPT+NEH o aumento de células fractais (de duas para três) ajudou a reduzir o tempo de espera do lote. Os melhores tempos foram obtidos com o SPT e LPT+NEH. Por outro lado, houve piora de tempo de espera de lote no LIFO e LPT.

Figura 4: Tempo de espera de lotes para cada um dos critérios (arranjo físico de pequeno porte)



Deseja-se comparar, em pares, os diferentes critérios de ordenação em relação ao que apresentar o melhor desempenho, no caso, o LPT+NEH. Utilizaremos o teste de Wilcoxon, que é um tipo de teste de sinais. Para n acima ($\geq$) de 20, podemos usar a estatística z de Wilcoxon.

Para teste de hipóteses, definiu-se no H_0 que a diferença é insignificante em relação ao LPT+NEH, caso contrário, no H_1 a diferença é significativa e a comparação está na Tabela 4.

Tabela 4: Comparação estatística dos tempos de espera de lotes entre tratamentos (critérios de ordenação) para arranjo físico de pequeno porte

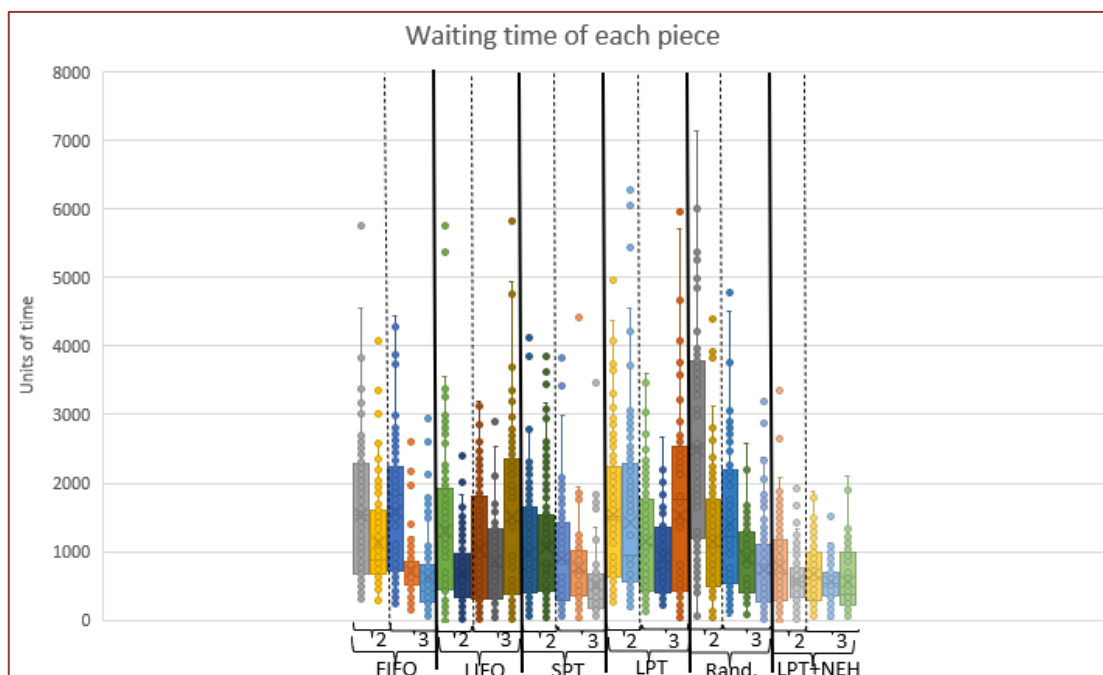
		FIFO	LIFO	SPT	LPT	Random
2 cells	LPT+NEH	$z=10.41$	$z=2.02$	$Z=3.81$	$Z=10.72$	$Z=9.22$
	Decision	Reject H_0	Reject H_0	Reject H_0	Reject H_0	Reject H_0
3 cells	LPT+NEH	$Z=6.57$	$z=6.29$	$Z=0.71$	$Z=10.49$	$Z=7.90$
	Decision	Reject H_0	Reject H_0	Accept H_0	Reject H_0	Reject H_0

Concluimos que, na Figura 4 não só mostram que os tempos de espera de lotes em SPT para três células serem equiparáveis a LPT+NEH, mas também pode-se afirmar que estatisticamente são idênticos. Enquanto os demais tempos de espera de lotes, todos são estatisticamente diferentes.

Como a espera de lote em SPT é estatisticamente igual ao LPT+NEH, deseja-se investigar o por que o makespan de um ser estatisticamente maior que o outro. A Figura 5 visa

mostrar o tempo total de espera de cada unidade produzida dentro de cada uma das células fractais. Com o emprego de duas células fractais, o menor tempo de espera foi a ordenação baseada em LPT+NEH. De uma forma geral, o aumento de número de células fractais permite a redução do tempo de espera, exceto no FIFO, LIFO e LPT. Parece que o aumento do número de células fractais (de dois para três) não ajudou muito a reduzir o tempo de espera de peças no LPT+NEH. Percebe-se que por conta de longa espera em fila que ocorre dentro de uma das células de um determinado critério, as demais células são prejudicadas. Por exemplo, veja a ordenação baseadas em SPT. Com o emprego de três células fractais (duas células apresentam redução de tempo de espera, mas por conta da primeira célula, as células 2 e 3 não colhem os benefícios dessa redução no makespan. Isso revela que para reduzir o makespan, deve-se ter tanto o tempo de espera de lote reduzido em todas as células utilizadas, quanto o tempo de espera de peças reduzido em todas elas. Como o LPT+NEH atende a esses dois critérios, portanto foi o que se beneficia com a redução de makespan.

Figura 5: Tempo de espera de cada peça dentro das células para cada um dos critérios (arranjo físico de pequeno porte)



Aplicando novamente o teste de Wilcoxon, ver Tabela 5, verifica-se que os tempos de espera são significativamente diferentes. E como resultado, aumento de makespan em relação ao LPT+NEH. Em especial, observe que os tempos de espera de peças são significativamente diferentes entre SPT e LPT+NEH. Isso ajuda a explicar que, para reduzir o makespan, é necessário que tanto o tempo de espera de lote aguardando para iniciar o processamento quanto o tempo de espera de peças dentro de cada célula esteja reduzidos.

Tabela 5: Comparação estatística entre os tempos de espera de cada peça entre tratamentos (critérios de ordenação) para arranjo físico de pequeno porte

		FIFO	LIFO	SPT	LPT	Random
2 cells	LPT+NEH	Z=26.96	Z=15.40	Z=15.88	Z=25.21	Z=25.78
	Decision	Reject H0	Reject H0	Reject H0	Reject H0	Reject H0
3 cells	LPT+NEH	Z=18.41	Z=19.73	Z=7.74	Z=23.59	Z=19.98
	Decision	Reject H0	Reject H0	Reject H0	Reject H0	Reject H0

7.2. ARRANJO FÍSICO DE MÉDIO PORTE

A Tabela 6 mostra os resultados da simulação para arranjo físico de médio porte (60 máquinas, usando a configuração 6x10). Observa-se que de uma maneira geral, não é vantajoso aumentar o número de células fractais, exceto no randômico que tem desempenho similar ao do LPT+NEH. No caso do LPT+NEH, houve melhora no makespan ao aumentar o número de células fractais (de dois para três).

O acréscimo de mais células fractais (de três para quatro) piora em 100 % dos critérios analisados. Os desempenhos em makespan entre quatro e cinco células são praticamente idênticos em FIFO, LPT e LPT+NEH. Apesar disso, em comparação com todos os demais critérios para muitas células fractais, o LPT+NEH continua apresentando o menor makespan.

Em comparação com a Tabela 3 (em se tratando de duas células fractais), pode-se verificar que os makespans da maioria dos critérios são mais reduzidos na Tabela 6, exceto para LPT+NEH, que teve pouca redução de makespan (de 1985 da Tabela 3 para 1872 da Tabela 6). Na realidade isso já era de se esperar devido ao aumento da capacidade produtiva (maior quantidade de máquinas). No entanto, reforçamos que o intuito não é sugerir às empresas que adquiram mais máquinas, porque isso acarretaria em aumento de custos. O objetivo é mostrar como diferentes tamanhos de empresas devem se organizar, em termos de quantidade de células fractais frente a uma listagem de produtos com as suas respectivas demandas, que reduza o makespan. Em se tratando de aumentar para três células fractais, pode-se notar que foi benéfico para todos os critérios considerados, ver Tabela 6 em comparação com a Tabela 3, novamente se destacando o LPT+NEH.

Para o LPT+NEH, é mais vantajoso trabalhar com arranjo físico de pequeno porte, porque o makespan é de 1985, enquanto no de médio porte foi de 2123. Caso opte por demais critérios, é mais apropriado trabalhar com arranjo físico de médio porte do que o que arranjo porte pequeno porque o makespan é menor.

Tabela 6: Resultados da simulação para arranjo físico de médio porte (6 x 10)

Arranjo físico de médio porte								
	FIFO	Makespan		LIFO	Makespan		SPT	Makespan
Cell 1	2807	2807	Cell 1	2861	2861	Cell 1	2723	2723
Cell 2	2155		Cell 2	1925		Cell 2	1851	
Cell 1	1811	2363	Cell 1	2034	2336	Cell 1	1917	2230
Cell 2	2363		Cell 2	2336		Cell 2	2230	
Cell 3	1752		Cell 3	1838		Cell 3	1789	
Cell 1	2540	2540	Cell 1	2645	2645	Cell 1	2554	2554
Cell 2	1570		Cell 2	1544		Cell 2	1474	
Cell 3	2237		Cell 3	2212		Cell 3	1910	
Cell 4	2006		Cell 4	1525		Cell 4	1479	
Cell 1	2498	2498	Cell 1	2385	2385	Cell 1	2441	2441
Cell 2	730		Cell 2	742		Cell 2	878	
Cell 3	1450		Cell 3	1253		Cell 3	1280	
Cell 4	1783		Cell 4	1649		Cell 4	1998	
Cell 5	1743		Cell 5	2285		Cell 5	2000	
	LPT	Makespan		Random	Makespan		LPT+NEH	Makespan
Cell 1	2623	2623	Cell 1	2882	2882	Cell 1	1872	1872
Cell 2	1699		Cell 2	1625		Cell 2	1319	
Cell 1	2292	2345	Cell 1	1633	2536	Cell 1	1469	1575
Cell 2	2345		Cell 2	2536		Cell 2	1557	
Cell 3	1894		Cell 3	2009		Cell 3	1575	
Cell 1	2547	2547	Cell 1	2485	2544	Cell 1	2211	2211
Cell 2	1457		Cell 2	1444		Cell 2	1060	
Cell 3	2208		Cell 3	2544		Cell 3	1472	
Cell 4	1917		Cell 4	1792		Cell 4	1397	
Cell 1	2604	2604	Cell 1	2179	2179	Cell 1	2123	2123
Cell 2	647		Cell 2	699		Cell 2	642	
Cell 3	1249		Cell 3	1254		Cell 3	1050	
Cell 4	1341		Cell 4	1756		Cell 4	1216	
Cell 5	2051		Cell 5	1917		Cell 5	1348	

Comparamos em seguida se há diferença estatística entre os critérios de ordenação no makespan. De fato, nenhum critério apresenta desempenho similar ao de LPT+NEH, porque todos os critérios em relação ao LPT+NEH fornecem $p=0.00018 < 0.05$, portanto rejeita H_0 .

Comparamos também o desempenho em makespan quanto à alteração de uso de células fractais. A formulação de hipóteses é, caso aceite H_0 , indica que não há diferença significativa (para menor) no makespan ao alterar de Y células a partir de X células, e H_1 caso contrário.

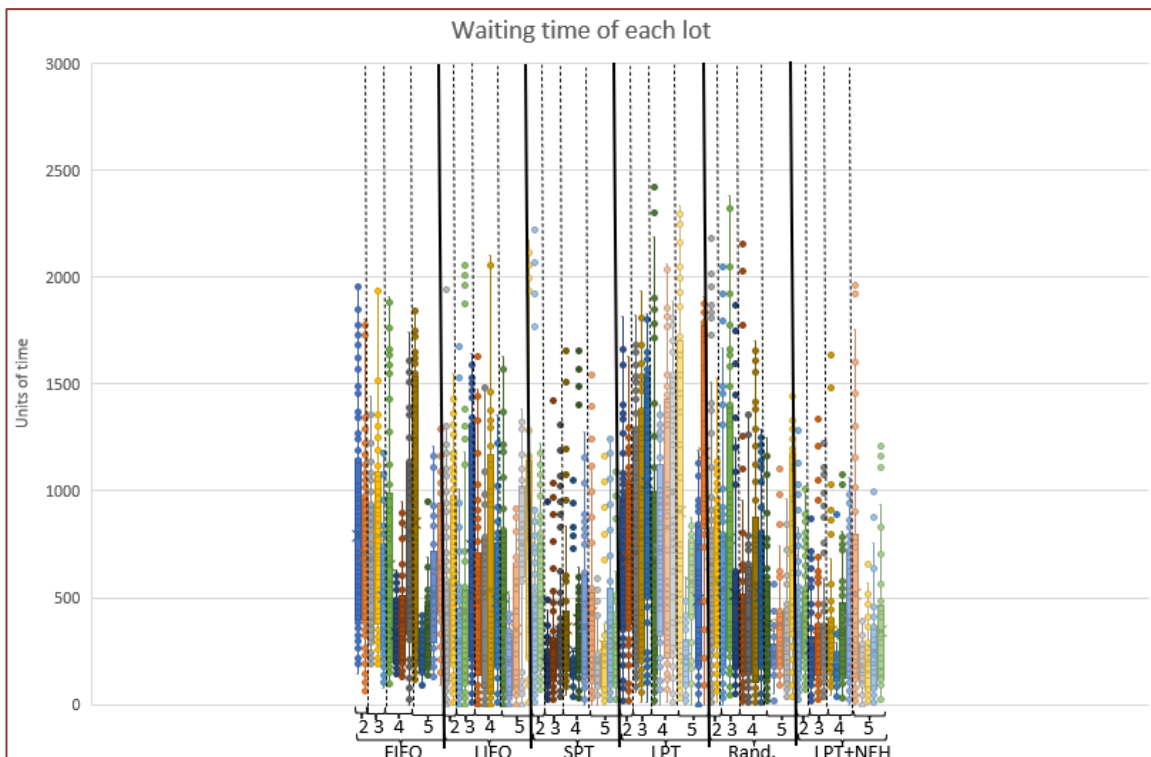
A análise estatística sugere que a escolha de número de células fractais seja feita com cautela. Por exemplo, quando a empresa estiver trabalhando com duas células e decidir mudar para três, de fato há melhora significativa no makespan, ver Tabela 7. O mesmo não se pode dizer caso opte por mudar para quatro ou cinco células fractais, pois o desempenho é estatisticamente parecido com o de duas células.

Tabela 7: Mostra se há variação significativa no makespan alterando-se o número de células fractais (médio porte)

	Number of fractal cells	To (Y)		
		3	4	5
From (X)	2	P=0.014<0.05, reject H0	P=0.102, accept H0	P=0.102, accept H0
	3	-	P=0.014<0.04, reject H0	P=0.102, accept H0
	4	-	-	P=0.102, accept H0

Nas Figuras 6 e 7, apresentam os tempos de espera de cada lote e os tempos de espera de cada peça, respectivamente. Observa-se que aumentar o número de células fractais pode aumentar o tempo de espera de lote como é o caso do FIFO, SPT, LPT, randômico, porém tende a diminuir o tempo de espera de peças durante o processamento.

O que se percebe, de uma forma geral, é que se há diminuição de tempo de espera do lote para iniciar processamento e se houver aumento do tempo de espera de peças durante o processamento, há aumento de makespan, ou vice-versa. Importante salientar que, em alguns casos, tanto o SPT quanto o LPT+NEH são os que apresentam os menores tempos de espera de peças durante o processamento. No entanto, em termos de makespan, o SPT acaba sendo maior que o LPT+NEH. Isso leva a crer que outros fatores não identificados podem estar contribuindo no aumento do makespan como a duração da operação, número de operações, número de lotes, tamanho do lote, ou tipos de operações envolvidos.

Figura 6: Tempo de espera de lotes para cada um dos critérios (arranjo físico de médio porte)

Comparou-se estatisticamente os diferentes critérios para arranjo físico de médio porte, ver Tabelas 8 e 9. Exceto no SPT, todas as comparações com o LPT+NEH resultaram em diferença significativa, indicando que o tempo de espera de lotes e o tempo de espera de cada peça é estatisticamente pior. O desempenho de SPT (espera de lotes) é estatisticamente similar ao de LPT+NEH quando se trabalha com quatro ou cinco células fractais. E a espera de peças dentro de cada célula ao utilizar três células fractais é similar ao de LPT+NEH, mas não foram possíveis a redução do makespan por fatores ainda não identificados como mencionamos.

Tabela 8: Comparação estatística entre os tempos de espera de lotes para diferentes critérios em relação ao LPT+NEH, para arranjo físico de médio porte

		FIFO	LIFO	SPT	LPT	Random
2 cells	LPT+NEH	Z=9.37	Z=4.12	Z=2.69	Z=9.32	Z=7.45
	Decision	Reject H0	Reject H0	Reject H0	Reject H0	Reject H0
3 cells	LPT+NEH	Z=9.67	Z=3.61	Z=-2.22	Z=9.71	Z=7.20
	Decision	Reject H0	Reject H0	Reject H0	Reject H0	Reject H0
4 cells	LPT+NEH	Z=6.57	Z=4.91	Z=-0.02	Z=8.23	Z=5.14
	Decision	Reject H0	Reject H0	Accept H0	Reject H0	Reject H0
5 cells	LPT+NEH	Z=8.41	Z=5.34	Z=1.06	Z=7.71	Z=3.67
	Decision	Reject H0	Reject H0	Accept H0	Reject H0	Reject H0

Figura 7: Tempo de espera de cada peça dentro das células para cada um dos critérios (arranjo físico de médio porte)

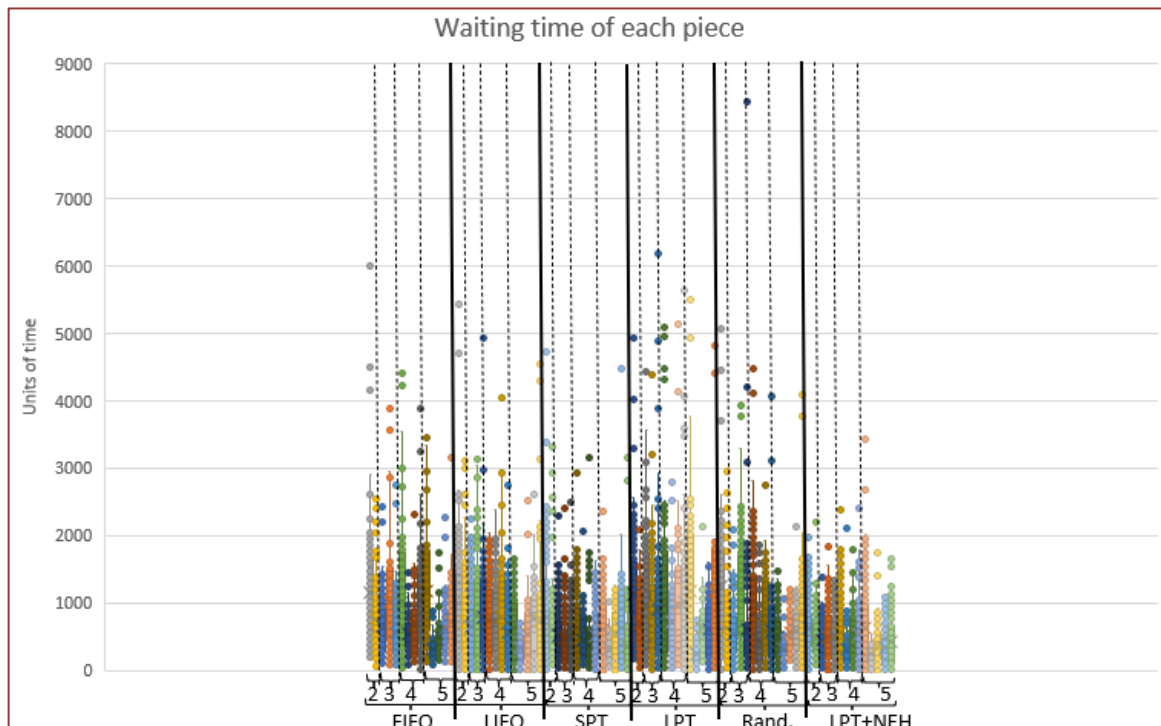


Tabela 9: Comparação estatística entre os tempos de espera de cada peça para diferentes critérios em relação ao LPT+NEH, para arranjo físico de médio porte

		FIFO	LIFO	SPT	LPT	Random
2 cells	LPT+NEH	Z=21.39	Z=16.19	Z=10.24	Z=21.78	Z=19.76
	Decision	Reject Ho	Reject Ho	Reject Ho	Reject Ho	Reject Ho
3 cells	LPT+NEH	Z=14.72	Z=14.15	Z=0.16	Z=19.17	Z=14.24
	Decision	Reject H0	Reject H0	Accept H0	Reject H0	Reject H0
4 cells	LPT+NEH	Z=18.98	Z=11.45	Z=4.11	Z=17.67	Z=11.98
	Decision	Reject H0	Reject H0	Reject H0	Reject H0	Reject H0
5 cells	LPT+NEH	Z=24.43	z=14.54	Z=8.95	Z=22.90	Z=13.33
	Decision	Reject H0	Reject H0	Reject H0	Reject H0	Reject H0

7.3. ARRANJO FÍSICO DE GRANDE PORTE

E por fim, os resultados da Tabela 10 mostram os desempenhos em makespan para arranjos físicos de grande porte (90 máquinas, usando a configuração 9x10). Observa-se que é vantajoso ter grande número de células fractais. Percebe-se também que, conforme o número de células fractais aumenta, o desempenho dos critérios de ordenação tende a se equiparar, exceto o LPT+NEH que apresenta o melhor desempenho de todos. O makespan como um todo é menor em relação com a Tabela 6 devido ao aumento da capacidade produtiva (maior quantidade de máquinas no arranjo físico fractal como um todo). A comparação estatística mostra que todos os critérios apresentam makespans estatisticamente superiores (piores) ao de LPT+NEH, ver Tabela 11.

Tabela 10: Resultados da simulação para arranjo físico de grande porte

	FIFO	Makespan		LIFO	Makespan		SPT	Makespan
Cell 1	2335	2430	Cell 1	2464	2464	Cell 1	2167	2167
Cell 2	2430		Cell 2	1808		Cell 2	1961	
Cell 1	2584	2584	Cell 1	2664	2664	Cell 1	2727	2727
Cell 2	2441		Cell 2	1574		Cell 2	1729	
Cell 3	1743		Cell 3	2006		Cell 3	1743	
Cell 1	1615	2117	Cell 1	2004	2004	Cell 1	1796	1796
Cell 2	1140		Cell 2	1391		Cell 2	1241	
Cell 3	2117		Cell 3	1615		Cell 3	1780	
Cell 4	1901		Cell 4	1610		Cell 4	1696	
Cell 1	1409	1549	Cell 1	2075	2075	Cell 1	2233	2233
Cell 2	636		Cell 2	739		Cell 2	868	
Cell 3	1067		Cell 3	1165		Cell 3	1188	
Cell 4	1549		Cell 4	1504		Cell 4	1544	
Cell 5	1103		Cell 5	1479		Cell 5	1520	
Cell 1	1516	1516	Cell 1	1696	1696	Cell 1	1506	1506
Cell 2	737		Cell 2	955		Cell 2	753	
Cell 3	688		Cell 3	816		Cell 3	688	
Cell 4	1188		Cell 4	1110		Cell 4	890	
Cell 5	958		Cell 5	985		Cell 5	918	
Cell 6	1342		Cell 6	1217		Cell 6	1217	

Tabela 10: Resultados da simulação para arranjo físico de grande porte. (continuação)

	LPT	Makespan		Random	Makespan		NEH	Makespan
Cell 1	2484	2484	Cell 1	2510	2510	Cell 1	2097	2097
Cell 2	1581		Cell 2	2379		Cell 2	1491	
Cell 1	2468	2604	Cell 1	2592	2592	Cell 1	2337	2337
Cell 2	2172		Cell 2	2427		Cell 2	1524	
Cell 3	2604		Cell 3	1743		Cell 3	1743	
Cell 1	1669	2911	Cell 1	1659	1659	Cell 1	1561	1561
Cell 2	1342		Cell 2	1411		Cell 2	1060	
Cell 3	1499		Cell 3	1442		Cell 3	1260	
Cell 4	2911		Cell 4	1312		Cell 4	1347	
Cell 1	1353	1528	Cell 1	2029	2029	Cell 1	1303	1303
Cell 2	550		Cell 2	641		Cell 2	545	
Cell 3	1101		Cell 3	1343		Cell 3	1012	
Cell 4	1076		Cell 4	1382		Cell 4	1076	
Cell 5	1528		Cell 5	1235		Cell 5	1071	
Cell 1	1434	1635	Cell 1	1550	1550	Cell 1	1117	1219
Cell 2	944		Cell 2	1152		Cell 2	944	
Cell 3	735		Cell 3	818		Cell 3	688	
Cell 4	1151		Cell 4	1342		Cell 4	857	
Cell 5	999		Cell 5	1406		Cell 5	867	
Cell 6	1635		Cell 6	1219		Cell 6	1219	

Tabela 11: Comparação estatística dos makespans de diferentes critérios em relação ao LPT+NEH para arranjo físico de grande porte

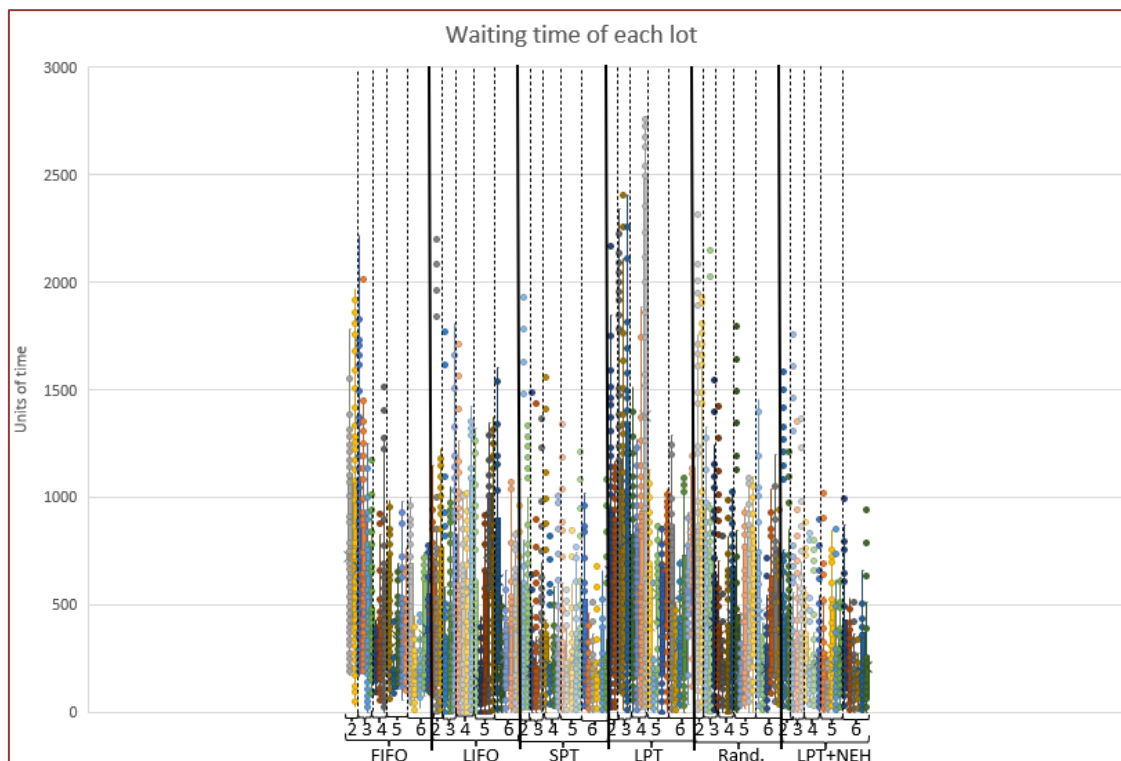
	FIFO	LIFO	SPT	LPT	Random
LPT+NEH	P=0.00016	P=0.00006	P=0.00097	P=0.00002	P=0.00016
Decision	P<0.05, then reject H ₀	P<0.05 then reject H ₀	P<0.05 then reject H ₀	P<0.05 then reject H ₀	P<0.05 then reject H ₀

Comparando a utilização de número de células fractais no arranjo físico de grande porte, ver Tabela 12, há um aumento significativo no makespan (piora) ao alterar de duas para três células, redução significativa de makespan de duas para seis células, de três para cinco, de três para seis, de quatro para seis. Por outro, desempenhos estatisticamente similares ao alterar de duas para cinco, de três para quatro, de quatro para cinco e de cinco para seis.

Tabela 12: Mostra se há variação significativa no makespan alterando-se o número de células fractais (grande porte)

		To (Y)			
From (X)		3	4	5	6
	2	P=0.014, reject H_0	P=0.102, accept H_0	P=0.102, accept H_0	P=0.014, Reject H_0
	3	-	P=0.102, accept H_0	P=0.014, reject H_0	P=0.014, reject H_0
	4		-	P=1, accept H_0	P=0.014, reject H_0
	5			-	P=0.102, accept H_0

A Figura 8 mostra redução de tempo de espera de lote, conforme aumenta-se o número de células fractais (no FIFO de quatro para cinco células fractais; no SPT de duas para três, quatro e cinco; no LPT+NEH de duas para três e quatro). Já em outros casos, há aumento de tempo de espera de lotes, conforme aumenta-se o número de células como LIFO (de três para quatro células), SPT (de cinco para seis células), LPT (de três para quatro células), no randômico (de quatro para cinco células).

Figura 8: Tempo de espera de lotes para cada um dos critérios (arranjo físico de grande porte)

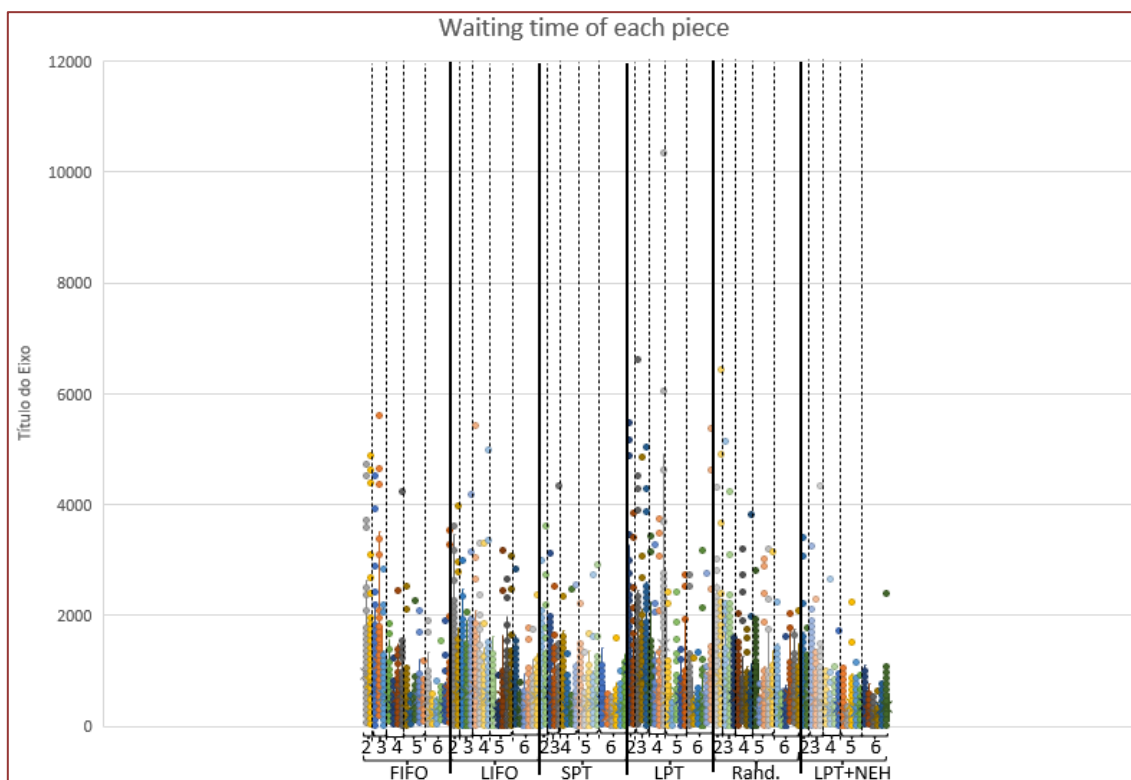
A comparação estatística acerca dos tempos de espera de lotes para cada um dos critérios pode ser vista na Tabela 13. Há alguns com desempenhos equiparáveis ao o LPT+NEH, mas por conta do tempo de espera de peça dentro da célula durante o processamento, acaba não produzindo redução no makespan.

Tabela 13: Comparação estatística entre os tempos de lotes para diferentes critérios em relação ao LPT+NEH, para arranjo físico de grande porte

		FIFO	LIFO	SPT	LPT	Random
2 cells	LPT+NEH	Z=8.35	Z=1.35	Z=0.10	Z=6.73	Z=7.28
	Decision	Reject H ₀	Accept H ₀	Accept H ₀	Reject H ₀	Reject H ₀
3 cells	LPT+NEH	Z=7.89	Z=0.86	Z=-2.10	Z=8.74	4.38
	Decision	Reject H ₀	Accept H ₀	Reject H ₀	Reject H ₀	Reject H ₀
4 cells	LPT+NEH	Z=5.91	Z=4.97	Z=0.90	Z=7.87	Z=2.86
	Decision	Reject H ₀	Reject H ₀	Accept H ₀	Reject H ₀	Reject H ₀
5 cells	LPT+NEH	Z=6.47	Z=6.63	Z=1.54	Z=8.06	Z=8.56
	Decision	Reject H ₀	Reject H ₀	Accept H ₀	Reject H ₀	Reject H ₀
6 cells	LPT+NEH	Z=6.46	Z=6.85	Z=-0.35	Z=8.63	Z=6.16
		Reject H ₀	Reject H ₀	Accept H ₀	Reject H ₀	Reject H ₀

De acordo com a Figura 9, o tempo de espera em fila durante o processamento é menor conforme aumenta-se no número de células fractais. Tanto o FIFO, o SPT e o LPT+NEH apresentam baixos tempos de esperas de peças ao utilizar muitas células. Mas o desempenho em makespan de FIFO e SPT são prejudicados por conta do elevado tempo de espera de lote em uma das 6 células.

Figura 9: Tempo de espera de cada peça dentro das células para cada um dos critérios (arranjo físico de grande porte)



A comparação estatística dos tempos de esperas de peças são significativamente maiores que em LPT+NEH, ver Tabela 14. Apenas as esperas em SPT são estatisticamente iguais ao de LPT+NEH.

Tabela 14: Comparação estatística entre os tempos de espera de cada peça para diferentes critérios em relação ao LPT+NEH, para arranjo físico de grande porte

		FIFO	LIFO	SPT	LPT	Random
2 cells	LPT+NEH	Z=16.08	Z=12.68	3.02	Z=14.93	Z=18.53
	Decision	Reject Ho	Reject Ho	Reject Ho	Reject Ho	Reject Ho
3 cells	LPT+NEH	Z=12.21	Z=7.02	Z=1.99	Z=16.25	Z=6.45
	Decision	Reject H0	Reject H0	Reject H0	Reject H0	Reject H0
4 cells	LPT+NEH	Z=12.37	Z=14.61	Z=6.69	Z=19.49	Z=13.37
	Decision	Reject H0	Reject H0	Reject H0	Reject H0	Reject H0
5 cells	LPT+NEH	Z=12.75	Z=19.41	Z=10.64	Z=18.63	Z=15.93
	Decision	Reject H0	Reject H0	Reject H0	Reject H0	Reject H0
6 cells	LPT+NEH	Z=11.56	Z=14.24	Z=1.15	Z=16.68	Z=13.95
	Decision	Reject H0	Reject H0	Accept H0	Reject H0	Reject H0

8. CONCLUSÃO

Neste artigo, apresentou-se o desempenho dos arranjos físicos fractais considerando a ordenação de produtos a serem submetidos ao processo. O makespan, o tempo de espera de cada lote bem como os tempos de espera de cada unidade produzida foram obtidos com a simulação.

Embora a regra LPT+NEH seja conhecida na literatura, ainda não haviam estudos que comparasse com as demais regras de ordenação aplicadas especificamente em arranjos físicos fractais. Além disso, este estudo é importante no sentido de que, devido à formação de células virtuais dentro de cada célula fractal, as peças poderiam ter que esperar mais do que o necessário pela máquina de uma determinada célula virtual, o que poderia prejudicar o desempenho do makespan, em especial o LPT+NEH. No entanto, este estudo mostrou que mesmo assim o LPT+NEH continua tendo excelente desempenho em makespan, em tempo de espera de lotes e em tempo de espera de cada peça.

Ainda, com este estudo, o gestor de empresa pode se organizar melhor em termos de número de células e em termos de quantidade total de máquinas, de modo que reduza o makespan. A simulação mostra que, para cada tamanho de fábrica, a escolha de número de células fractais para produzir uma relação de peças deve ser feita de forma criteriosa, pois a simples adição de célula pode ou melhorar ou piorar o makespan. Este estudo também mostrou que para melhorar o makespan, é necessário na maioria dos casos analisados, que o processo tenha menor tempo de espera de lotes e menor tempo de esperas de peças durante o processamento.

Com este estudo pode-se ajudar a explicar o porquê o LPT+NEH apresenta bom desempenho, que é pelo fato de que foi a única que conseguiu reduzir os tempos de fila (de lote e de cada peça).

A simulação mostrou que o LPT+NEH foi o que apresentou os melhores resultados em termos de makespan. Em particular, destaca-se esse critério para arranjos físicos de pequeno porte. Já em arranjos físicos de médio e grande porte, o uso de muitas células fractais permite que outros critérios apresentem desempenhos equiparáveis (makespan) ao de LPT+NEH, como é o caso do SPT.

Com a simulação, pode-se verificar que existe uma correlação negativa entre o tempo de espera de cada lote aguardando para iniciar o processamento com o tempo de espera de cada unidade durante o processamento dentro de cada célula fractal. Enquanto um for maior que o outro, o makespan como um todo tende a aumentar. De uma forma geral, para obter redução de makespan, é necessário que ambos os tempos de espera sejam reduzidos, como é o caso do LPT+NEH.

Neste estudo considerou-se que, assim que uma determinada regra de ordenação foi escolhida, todas as células fractais consideradas utilizam a mesma regra. Assim, como proposta para futuros trabalhos, sugere-se que cada célula fractal utilize entre elas regras diferentes de ordenação.

Evidentemente, sugere-se também considerar em futuros trabalhos outras regras de despacho, além de SPT, LPT, SPT, LPT, randômico e o LPT+NEH.

REFERÊNCIAS

- [1] ASKIN, R. G., CIARALLO, F. W. and LUNDGREN, N. H., 1999, An empirical evaluation of holonic and fractal layouts. *International Journal of Production Research*, 37, 961–978.

- [2] BENJAAFAR, S. and SHEIKHZADEH, M., 2000, Design of flexible plant layouts. *IIE Transactions*, 32, 309–322.
- [3] ELASKARI, S. & Venkatadri, U. (2002) - Understanding the Design Continuum Between Group Technology and Fractal Cell Designs for Manufacturing Systems Through the Central Backup Cellular Manufacturing System. *Operations Research Fórum*, vol. 3, n. 22, p. 1-37.
- [4] GUNASEKARAN, A., 1998, Agile manufacturing: enablers and an implementation framework. *International Journal of Production Research*, 36, 1223–1247.
- [5] Kalczynski, P. J. & Kamburowski, J. (2008) - An Improved NEH Heuristic to Minimize Makespan in Permutation Flow Shops. *Computers & Operations Research* Vol. 35, n. 9, pp. 3001–3008. doi:10.1016/j.cor.2007.01.020
- [6] Kalczynski, P. J. & Kamburowski, J. (2009) - An Empirical Analysis of the Optimality Rate of Flow Shop Heuristics. *European Journal of Operational Research*, vol. 198, n. 1, pp. 93–101. doi:10.1016/j.ejor.2008.08.021.
- [7] Liu, W., Jin, Y. & Price, M. (2016) - A New Nawaz–Enscore–Ham-Based Heuristic for Permutation Flow-Shop Problems with Bicriteria of Makespan and Machine Idle Time. *Engineering Optimization*, vol. 48, n. 10, p. 1808–1822. doi:10.1080/0305215X.2016.1141202.
- [8] Liu W., Jin Y. & Price, M. (2017a) - A new improved NEH heuristic for permutation flowshop scheduling problems, *International Journal of Production Economics*, Vol. 193, pp. 21–30. DOI: 10.1016/j.ijpe. 2017.06.026
- [9] Liu, W.; Jin, Y. & Price, M. (2017b) - New Scheduling Algorithms and Digital Tool for Dynamic Permutation Flowshop with Newly Arrived Order. *International Journal of Production Research*, vol. 55, n. 11, pp. 3234–3248. doi:10.1080/00207543.2017.1285077.
- [10] MONTREUIL, B., VENKATADRI, U. and RARDIN, R. L., 1999, Fractal layout organization for job shop environments. *International Journal of Production Research*, 37, 501–521.
- [11] Nawaz, M., E. E. Ensore Jr., and I. Ham. 1983. “A Heuristic Algorithm for the M-Machine, N-Job Flow-Shop Sequencing Problem.” *Omega* 11 (1): 91–95.
- [12] Puka, R.; Duda, J. & Stawowy, A. (2022) - Input Sequence of Jobs on NEH Algorithm for Permutation Flowshop Scheduling Problem, *Management and Production Engineering Review*, Volume 13, n.1, p. 32-43, DOI: 10.24425/mp.2022.140874.
- [13] PUKA, R.; Duda, J.; Stawowy, A. & Skalna, I. (2021) - NEH+ algorithm for solving permutation flow shop problems, *Computers & Operations Research*, Volume 132, 2021, 105296, ISSN 0305-0548, <https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105296>.
- [14] Ruiz, R. & Maroto, C. (2005). A comprehensive review and evaluation of permutation flowshop heuristics. *European Journal of Operational Research*, 165(2), 479-494.
- [15] SAAD, S. M. & LASSILA, A. M. (2004) - Layout design in fractal organizations. *Int. j. prod. res.*, 1 september 2004, vol. 42, no. 17, 3529–3550.
- [16] Sharmaa, M.; Sharmaa, M. & Sharma, S. (2021) - An improved NEH heuristic to minimize makespan for flow shop scheduling problems. *Decision Science Letters*, vol. 10, p.311-322.
- [17] Shih, Y. C. (2024) – Impacts of maintenance policies on fractal layout performance. *International Journal of Simulation Modelling*, vol. 23, n. 3, p. 401-411.
- [18] Shih, Y. C. & Gonçalves Filho (2014) - A design procedure for improving the effectiveness of fractal layouts formation. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, vol. 28, n. 1, p. 1-26.
- [19] Taillard, E. (1990). Some efficient heuristic methods for the flow shop sequencing problem. *European Journal of Operational research*, 47(1), 65-74.
- [20] VENKATADRI, U., RARDIN, R. L. and MONTREUIL, B., 1997, A design methodology for fractal layout organization. *IIE Transactions*, 29, 911–924.
- [21] WARNECKE, H. J., 1993, *The Fractal Company — A Revolution in Corporate Culture* (Berlin: Springer).

- [22] Yang, S. & Wang, D. (2001) – A new adaptive neural network and heuristics hybrid approach for job-shop scheduling. *Computers & Operations Research*, n. 28, p. 955-971.
- [23] Zhang, J., Dao, S. D., Zhang, W., Goh, M., Yu, G., Jin, Y., & Liu, W. (2023). A new job priority rule for the NEH-based heuristic to minimize makespan in permutation flowshops. *Engineering Optimization*, 55(8), 1296–1315. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2022.2085259>

Capítulo 13

Identificação de diferentes concentrações de corantes utilizando imagens digitais

William Moura Oliveira

Mário Cupertino da Silva Júnior

Gustavo de Oliveira Werneck

Jorge David Alguiar Bellido

Lisbeth Zelayaran Melgar

Marcos Vinícius Lopes Pereira

Michel Carlo Rodrigues Leles

Resumo: Esse trabalho teve como objetivo a detecção de diferentes concentrações de corantes, diluídos em água, através de imagens digitais RGB, capturadas por uma webcam. Esta detecção segue como uma alternativa de baixo custo para substituição do espectrofotômetro, que é um equipamento consolidado para tal aplicação. Das imagens capturadas foram recortadas áreas de 40×100 pixels, e o valor destes pixels foram utilizados no processamento, gerando 4 tipos de modelos. Comparou-se os resultados destes modelos com os valores obtidos pelo espectrofotômetro, em todas as amostras. O melhor resultado foi obtido pelo modelo logarítmico, referente a banda com menor variação normalizada, com aproximação quadrática apresentando um coeficiente de correlação superior a 0,9712. Concluiu-se que o uso da tecnologia de processamento de imagens digitais tem potencial para detectar diferentes concentrações de corantes puros, sem misturas.

Palavras-chave: Visão Computacional, Engenharia Química, Tecnologias Digitais.

1. INTRODUÇÃO

Os corantes têxteis são utilizados em larga escala nas indústrias para a pigmentação de diversos tipos de tecidos, onde sua aplicação é realizada em três etapas: montagem, fixação e tratamento final (Guaratini et al., 2000). A forma de fixação da molécula do corante a essas fibras do tecido, geralmente é feita em solução aquosa e pode envolver basicamente quatro tipos de interações: ligações iônicas, de hidrogênio, de Van der Waals e covalentes. Contudo, nem todo o material do corante é fixado ao tecido e esse resíduo precisa de um tratamento antes de ser despejado na rede fluvial.

Para desenvolvimento de técnicas no tratamento de tais resíduos, é necessário o acompanhamento de um grande número de amostras de diversas concentrações de corantes. As análises são realizadas através da utilização da espectrofotometria, método responsável por analisar a absorbância de uma solução. A espectrofotometria é realizada através do espectrofotômetro, que é um aparelho capaz de lançar um feixe de luz em um comprimento de onda do espectro e, assim, determinar a quantidade de luz absorvida pela substância (absorbância). A partir de amostras de concentrações conhecidas é possível obter um modelo correlacionando a absorbância da amostra com a concentração da solução. O espectrofotômetro apresenta como vantagem sua grande precisão e a fácil leitura, mas como desvantagem, sua portabilidade, que é limitada, assim como o alto custo para aquisição e manutenção (Gomes et al., 2008).

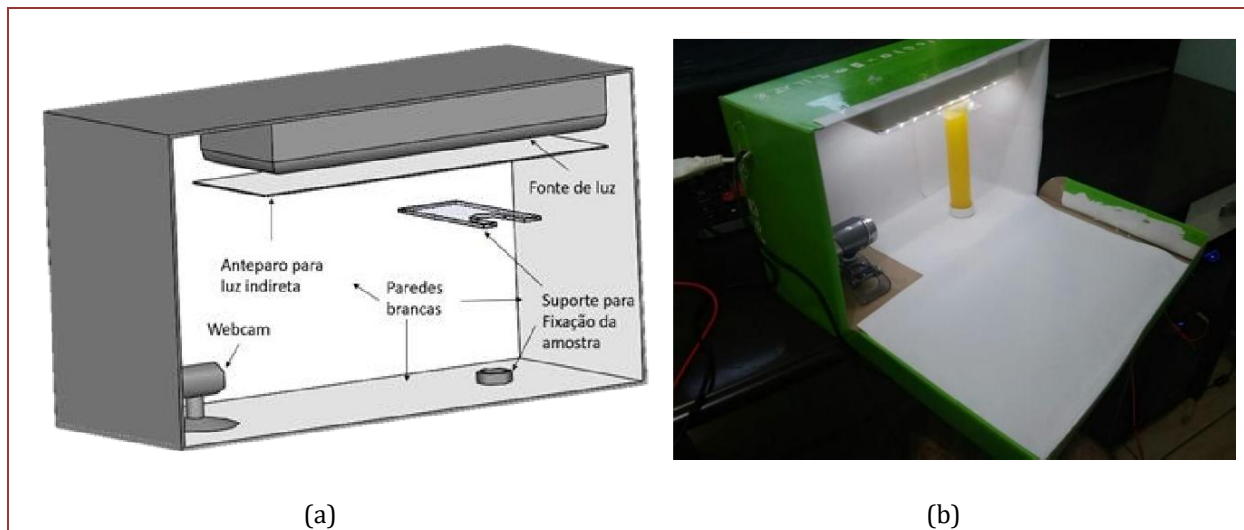
Como alternativa, esse trabalho apresentou um método alternativo para calcular a absorbância dessas amostras a partir de capturas de imagens coloridas no padrão RGB. As imagens RGB são compostas por uma matriz de três dimensões, que apresenta os canais: vermelho (R), verde (G) e azul (B), que representam as cores primárias do sistema subtrativo de cores (Godinho et al., 2008). O processamento dessas imagens pode fornecer informações referentes a quantidade de cor dos objetos, e com isso, promover a identificação de diferentes concentrações de corantes em soluções aquosas.

Sendo assim, o presente trabalho teve como objetivo principal detectar diferentes níveis de concentração de corantes diluídos em água, por meio do processamento de imagens digitais. E como objetivos específicos, o desenvolvimento de modelos matemáticos, obtidos pelas imagens, para avaliar a correlação das bandas RGB com os valores de absorbância gerados pelo espectrofotômetro.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para a aquisição das imagens foi construído um ambiente controlado de modo a evitar mudanças bruscas de luminosidade durante a coleta de dados, e consequentemente, para que minimizasse a influência da luminosidade externa nos resultados. Este ambiente está ilustrado pela Figura 1. Utilizou-se uma caixa com um interior preenchido de branco para uniformizar a iluminação interna. O plano de fundo serviu para normalizar os efeitos de variação da luminosidade, uma vez que a webcam possui uma configuração de fábrica que promove uma correção automática do brilho nas imagens, alterando seus valores de pixels.

Figura 1: Ambiente controlado para aquisição das imagens em, (a) croqui e (b) o real construído



Um anteparo foi inserido abaixo da fonte de luz para impedir a reflexão desta nos tubos de ensaio, que continham as amostras com diferentes concentrações de corante. Com isso a luz do ambiente se dava de forma indireta e uniforme. Para testar a potencialidade do uso de imagens na detecção das diferentes concentrações dos corantes diluídos em água, fez-se um experimento utilizando três corantes: Vermelho Congo, Verde Malaquita e Violeta Cristal, sendo o Vermelho Congo e Verde Malaquita corantes com forte influência das cores primárias capturadas pelas imagens digitais, o vermelho e azul nos respectivos corantes. Já o Violeta Cristal apresentou uma cor resultante fruto da combinação de duas cores primárias, de modo a não possuir em seus canais RGB um canal com valores predominantes aos demais. Utilizou-se as concentrações: 0,225, 0,45, 1,87, 3,75, 7,5, 10, 12,5, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60 mg/L, do corante Vermelho Congo, em tubos de ensaio, sendo que cada concentração continha três repetições, perfazendo um total de 42 amostras. O corante Verde Malaquita foi diluído em concentrações de: 0,225, 0,45, 1,87, 3,75, 7,5, 10, 12,5, 15, 20 mg/L, com três repetições totalizando 24 amostras. Para o corante Violeta cristal as concentrações de: 0,225, 0,45, 1,87, 3,75, 7,5, 10, 12,5, 15, 20, 25, 30, 40, 50 mg/L, realizando três repetições resultando em 39 amostras.

A variação no número de amostras e concentrações se deu devido a limitação do espectrofotômetro que possui um limite de saturação em sua leitura que impossibilita a utilização dos dados acima de determinadas concentrações para cada corante. As concentrações utilizadas buscaram utilizar toda a escala disponível para cada corante utilizado.

Para cada amostra foi capturada uma imagem, e em seguida, coletou-se uma porção do líquido e o inseriu no espectrofotômetro, modelo UV-VIS, fabricante Shimadzu. Como o espectrofotômetro é um equipamento comercial e confiável na identificação de concentrações de corantes, este equipamento foi utilizado como referência, para avaliar o potencial das imagens e informar a sua correlação com as informações obtidas pelo processamento destas.

Para cada substância testada no espectrofotômetro, é necessário que seja especificado o comprimento de onda para a análise, onde idealmente é utilizado o pico de absorbância. Assim, para as análises deste trabalho os comprimentos de onda analisados através do

espectrofotômetro, para os corantes Vermelho Congo, Verde Malaquita e Violeta Cristal foram de: 479, 617 e 545 nm, respectivamente.

Todos os equipamentos utilizados neste experimento foram disponibilizados pelo Departamento de Engenharia Química, da Universidade Federal de São João del-Rei, Campus Alto Paraopeba.

Após a aquisição das imagens, utilizou-se o método desenvolvido por Kehoe et al., (2013) para o processamento das imagens. Primeiramente, foi realizado o recorte de duas regiões, A e B, de 40 x 100 pixels, nas imagens, como demonstrado pela Figura 2, sendo um referente ao centro do tubo de ensaio e a outra ao plano de fundo. As regiões recortadas são as que foram processadas, e a média dos valores de pixels em cada banda é que foi utilizado na construção dos modelos de regressão, responsáveis também pela correlação com os valores de concentração fornecidos pelo espectrofotômetro.

Figura 2: Recorte das regiões A, no plano de fundo, e B, no tubo de ensaio com o corante



As imagens digitais foram capturadas pela webcam da marca Cimkiz, modelo A860, sendo todas estas coloridas e no padrão RGB (Red, Green e Blue), em tradução direta (vermelho, verde e azul), respectivamente. Além disso, todas as imagens foram formadas pela luz refletida no objeto, assim, ao calcular a média dos valores de pixels, obteve-se um valor ligado a luz refletida da amostra analisada. Esta reflectância foi relacionada à absorbância, que se refere a luz absorvida pelo objeto, através da equação 1.

$$A = -\log(I_n/I_b) \quad (1)$$

Onde, I_n é a média dos valores de pixels da banda R, G ou B, na área recortada do tubo de ensaio e I_b representa a média dos valores de pixels da mesma banda, na área recortada do plano de fundo. Lembrando que como a webcam capturava imagens coloridas do padrão RGB, em cada tipo e concentração de corante, a imagem capturada, tanto do tubo de ensaio (região A), quanto do plano de fundo (região B), continha as três bandas RGB.

A variável “A”, da equação 1, representa a absorbância calculada a partir das imagens, sendo uma relação logarítmica.

Ao dividir I_n por I_b também se efetuou a normalização dos valores, amenizando possíveis variações de luminosidade. Portanto, outra variável analisada, foi a normalização.

Para observar o comportamento das variáveis obtidas pelo processamento das imagens digitais, em relação às diferentes concentrações, em mg/l, de cada corante, gerou-se diversos gráficos e modelos matemáticos, que podem ser observados pelas figuras de 3 a 14. Estes gráficos e modelos servem para avaliar tendências, relações e influências entre as variáveis observadas e as diferentes concentrações de corantes. Essas variáveis observadas, obtidas pelo processamento das imagens capturadas foram:

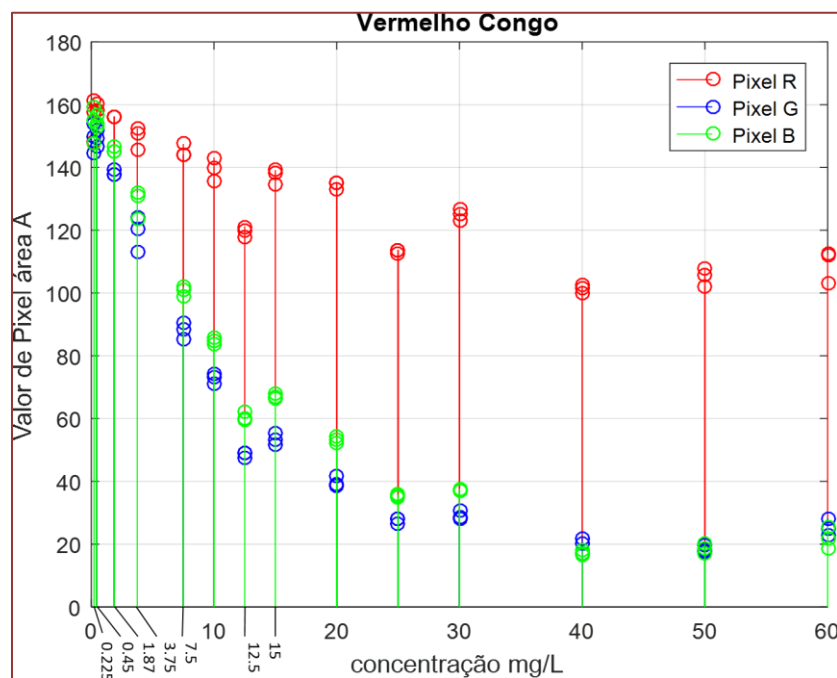
- A média dos valores brutos de pixel, de cada imagem de tubo de ensaio (região A), para cada banda espectral (R, G e B), rotulada nos eixos y dos gráficos de “Valor de Pixel da área A”;
- A média dos valores normalizados (I_n/I_b), de cada imagem das regiões A e B, rotulada nos eixos y dos gráficos de “Valor de Pixels Normalizados” ou apenas “Pixel Normalizado”;
- A absorbância calculada pela equação 1, rotulada nos eixos y dos gráficos de “Absorbância calculada A”.

Para avaliar o potencial do uso das imagens digitais RGB, no processo de identificação das concentrações destes corantes, efetuou-se dois testes. Um para avaliar quantitativamente a correlação entre os valores de absorbância obtidos pelo espectrofotômetro UV-VIS, considerado o método de referência, com os valores das variáveis observadas, “Pixel Normalizado” e “Absorbância calculada A”. O segundo teste foi criado para possibilitar a verificação dos modelos matemáticos gerados anteriormente, na determinação de concentrações desconhecidas de corantes. Para tanto, tal teste foi realizado apenas para o corante Vermelho Congo, mas poderia ter sido realizado para todos os outros corantes utilizados neste estudo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De modo geral, é possível observar pelos gráficos presentes nas Figuras 3 a 8, que as diferentes concentrações dos diferentes corantes, promoveram influências distintas nos valores dos pixels das imagens. Nestes gráficos, cada concentração, contem três círculos vermelhos, três círculos verdes e três círculos azuis, que representam as três bandas espectrais RGB de cada uma das três amostras (repetições). Sendo que nas Figuras 3, 4 e 5, os valores advindos do processamento das imagens fez uso das médias diretas dos valores de pixels, já nas Figuras 6, 7 e 8 estes valores vieram da média da normalização dos pixels (I_n/I_b). O valor de cada pixel, em cada banda espectral, pode variar entre 0 e 255, pois todas as imagens capturadas pela câmera deste estudo são de 8 bits.

Figura 3: Média dos valores de pixel, para cada banda espectral (R, G e B), obtidos por cada imagem de amostra do tubo de ensaio (região A), para todas as concentrações do corante Vermelho Congo

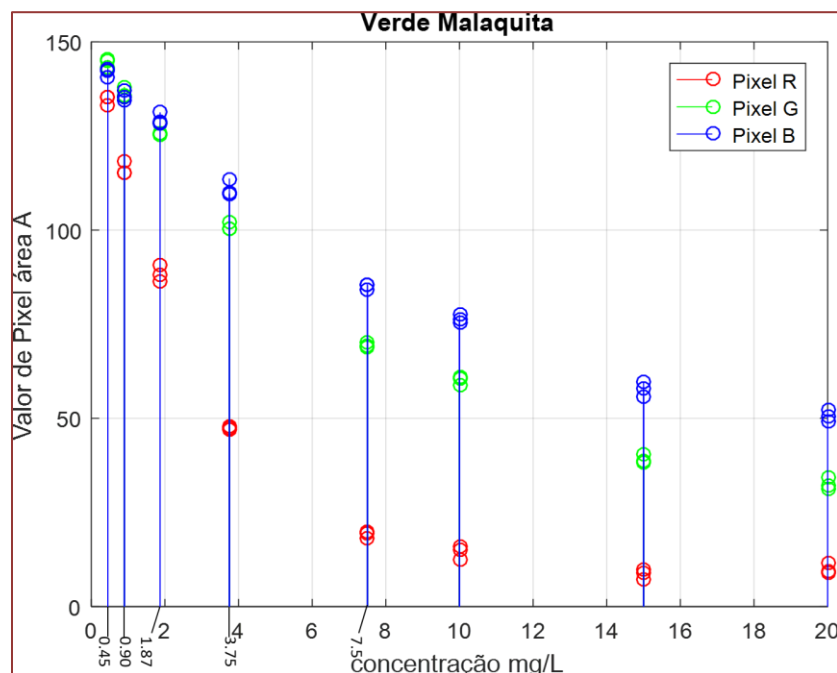


É possível observar ainda na Figura 3, que houve uma maior distinção perceptível em R do que em B ou G. Entretanto, os valores de pixel na banda R variaram dentro de uma menor faixa valores, entre 100 e 160. Já os valores de pixels das bandas G e B variaram em uma maior faixa, por volta de 160 a pouco menos de 20. As bandas G e B, para este corante Vermelho Congo mostraram ter influência parecida, com valores de pixels semelhantes. Outro fato relevante a se observar nesta figura é que da dose de 40mg/L para valores maiores, nota-se uma acomodação dos valores de pixels, para todas as bandas. Isso indica que essa concentração, para esse determinado corante, tende a ser o limite detectável pelas médias dos valores de pixels.

É importante citar que o quão os três círculos de mesma cor, presentes nestas Figuras 3 a 8, estão sobrepostos, indica o quão não houve a variação do valor de pixel, da mesma banda espectral na mesma concentração. Ou seja, mesmo sendo amostras da mesma concentração, do mesmo corante, da mesma câmera e mesmo ambiente, o valor de pixel pode ser diferente, mostrando que cada amostra/repetição tem sua particularidade e pode sofrer influências mínimas de iluminação do ambiente, durante a captura e formação das imagens, como também pode haver pequenas diferenças na própria dosagem do corante, durante a construção das amostras de concentrações em laboratório, capazes de variar o valor do pixel.

As médias dos valores de pixel mostrados na Figura 4 são referentes às diferentes concentrações do corante Verde Malaquita. Estas médias demonstraram ter uma maior faixa de valores de pixel nas banda B e G, ao contrário do observado pela banda R. Uma saturação em 15mg/L foi destacada, para as três bandas RGB, indicando que essa concentração, para esse determinado corante, tende a ser o limite detectável pelas médias dos valores de pixels.

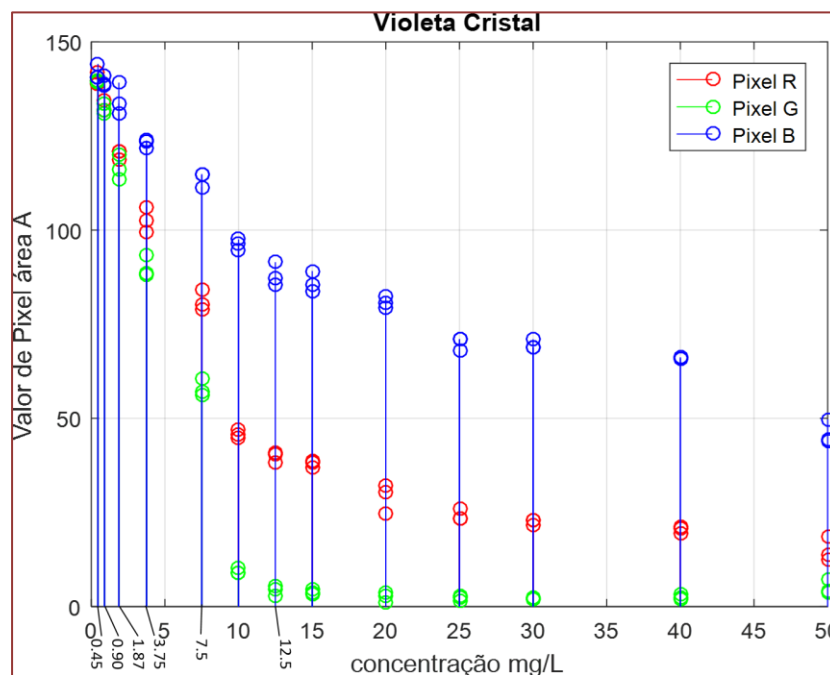
Figura 4: Média dos valores de pixel, para cada banda espectral (R, G e B), obtidos por cada imagem de amostra do tubo de ensaio (região A), para todas as concentrações do corante Verde Malaquita



Ainda na Figura 4, apesar das bandas G e B possuírem maior faixa de valores de pixels, por volta de 30 a 150 para o G e de 50 a quase 150 para o B, para pequenos valores de concentrações, os valores de pixels destas duas bandas são muito parecidos, promovendo certa sobreposição entre os círculos, mostrando que as bandas G e B podem ter mesmo efeito na detecção destas concentrações. Assim, apesar do corante se chamar Verde Malaquita e a banda G possuir maior faixa de pixel, a banda B tem comportamento similar, podendo também ser utilizada para detecção das concentrações.

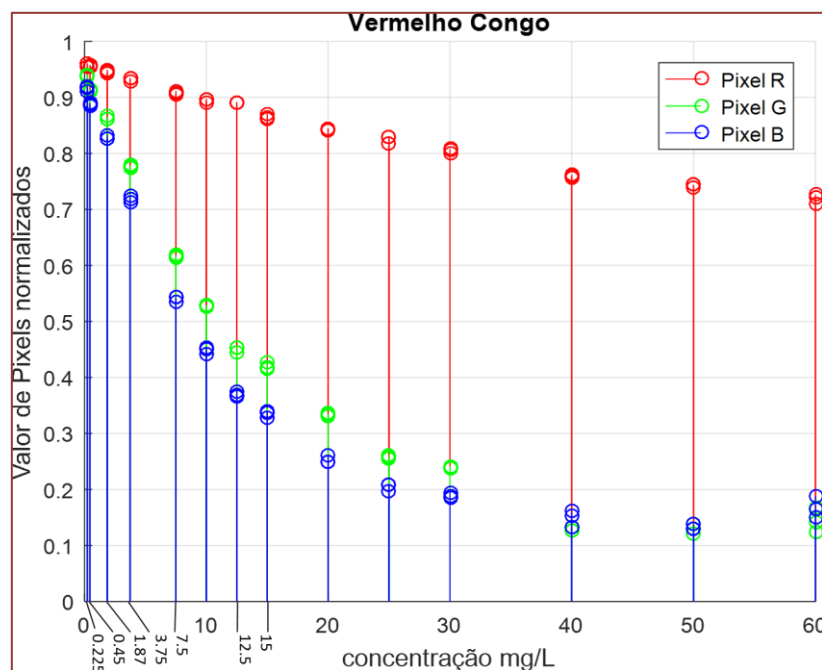
Na Figura 5 é possível observar que no corante Violeta Cristal a banda B possui um decaimento mais suave nos valores dos pixels, em relação as outras bandas, à medida que se aumenta a concentração do corante na água. Isso indica um comportamento quase que constante ao longo de todas as concentrações, com tendência a saturação a partir da dose de 25mg/L. Já tanto a banda G, quanto a banda R possuem mudança brusca no decaimento do valor de pixel entre as concentrações de 7,5 e 10 mg/L, com a banda G apresentando uma tendência de saturação a partir da concentração de 12,5 mg/L e banda R a partir da concentração de 20 mg/L. Essa maior linearidade da banda B, faz dela a mais adequada para detectar as diferentes concentrações do Violeta Cristal.

Figura 5: Média dos valores de pixel, para cada banda espectral (R, G e B), obtidos por cada imagem de amostra do tubo de ensaio (região A), para todas as concentrações do corante Violeta Cristal



A normalização da região A pela região B (In/Ib), promoveu uma redução perceptível das variações dos valores das mesmas bandas entre as repetições, favorecendo a distinção de entre as bandas, na identificação das diferentes concentrações dos corantes, como pode ser visualizado pelas Figuras 6, 7 e 8. Essa normalização também ajudou na continuidade da tendência, minimizando oscilações entre as concentrações dos corantes. No caso do Vermelho Congo, Figura 6, a normalização acabou com as oscilações entre os valores da mesma banda espectral, mostrando a tendência contínua dos valores irem diminuindo a medida que a concentração aumentava. Com isso, a distinção do comportamento das três bandas ao longo de todas as concentrações ficou mais visível, favorecendo a detecção destas, principalmente, pela banda R. Com a normalização, as variações de iluminação ou de qualquer outro parâmetro externo ou interno da câmera, como ajustes automáticos de contraste e brilho, que possam influenciar no valor digital do pixel, são minimizados ou até mesmos eliminados, uma vez que a divisão de In por Ib , coloca o efeito influenciador no numerador e também no denominador, fazendo com que um anule o outro. Através da Figura 6 é possível observar que os dados da banda R foram os que mais se aproximaram de uma reta, demonstrando maior linearidade, dentre as três bandas espectrais, neste corante.

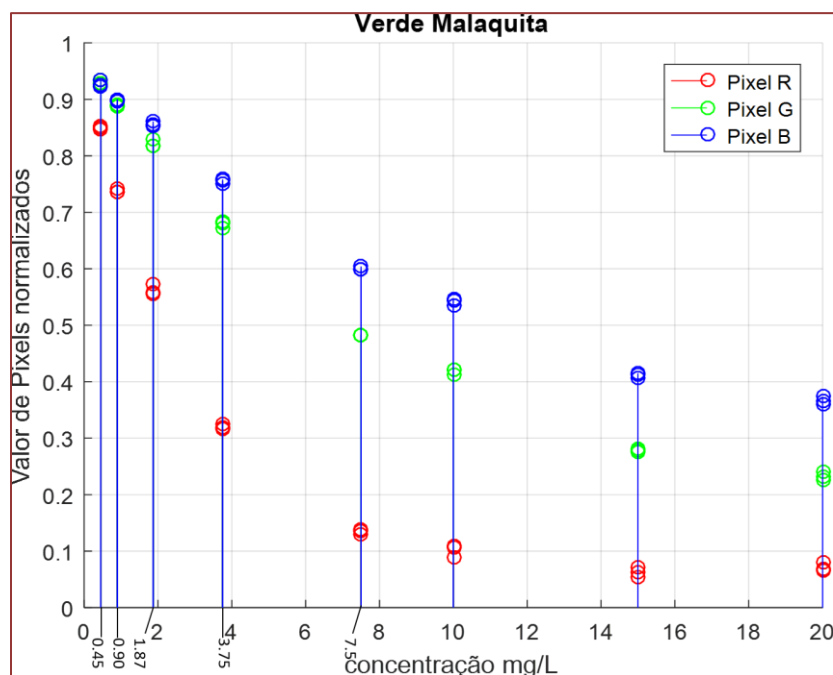
Figura 6: Valores de Pixel Normalizado, para cada banda espectral (R, G e B), obtidos por cada imagem de amostra do tubo de ensaio (região A), para todas as concentrações do corante Vermelho Congo



A normalização do Verde Malaquita ilustrado na Figura 7, apresentou menor impacto, se comparado ao Vermelho Congo, mas atuou minimizando variações entre as mesmas bandas de amostras de mesma concentração. Isso demonstra uma redução na diferença entre os valores de pixels das mesmas bandas, das amostras de mesma concentração. É como se as repetições mitigassem suas diferenças. As bandas G e B tiveram um comportamento semelhante, apresentando um decaimento parecido dos valores, tendendo a saturação a partir da concentração de 40 mg/L. Já a banda R apresentou decaimento contínuo até o último valor de concentração do corante, 60 mg/L, aproximando os dados ao de uma reta decrescente.

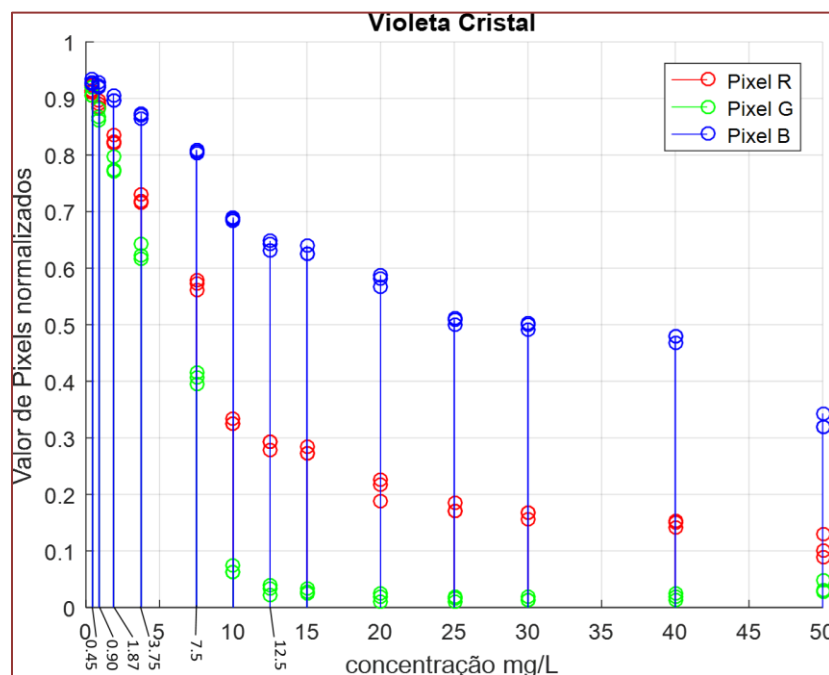
No corante Verde Malaquita, novamente as bandas espectrais G e B obtiveram valores de pixels próximos e distantes da banda R. Isso reforça a maior influência destas duas bandas nesse corante, do que a da banda R.

Figura 7: Valores de Pixel Normalizado, para cada banda espectral (R, G e B), obtidos por cada imagem de amostra do tubo de ensaio (região A), para todas as concentrações do corante Verde Malaquita



A normalização (I_n/I_b) no corante Violeta Cristal, e seu efeito nas três bandas espectrais RGB, pode ser visualizada pela Figura 8.

Figura 8: Valores de Pixel Normalizado, para cada banda espectral (R, G e B), obtidos por cada imagem de amostra do tubo de ensaio (região A), para todas as concentrações do corante Violeta Cristal



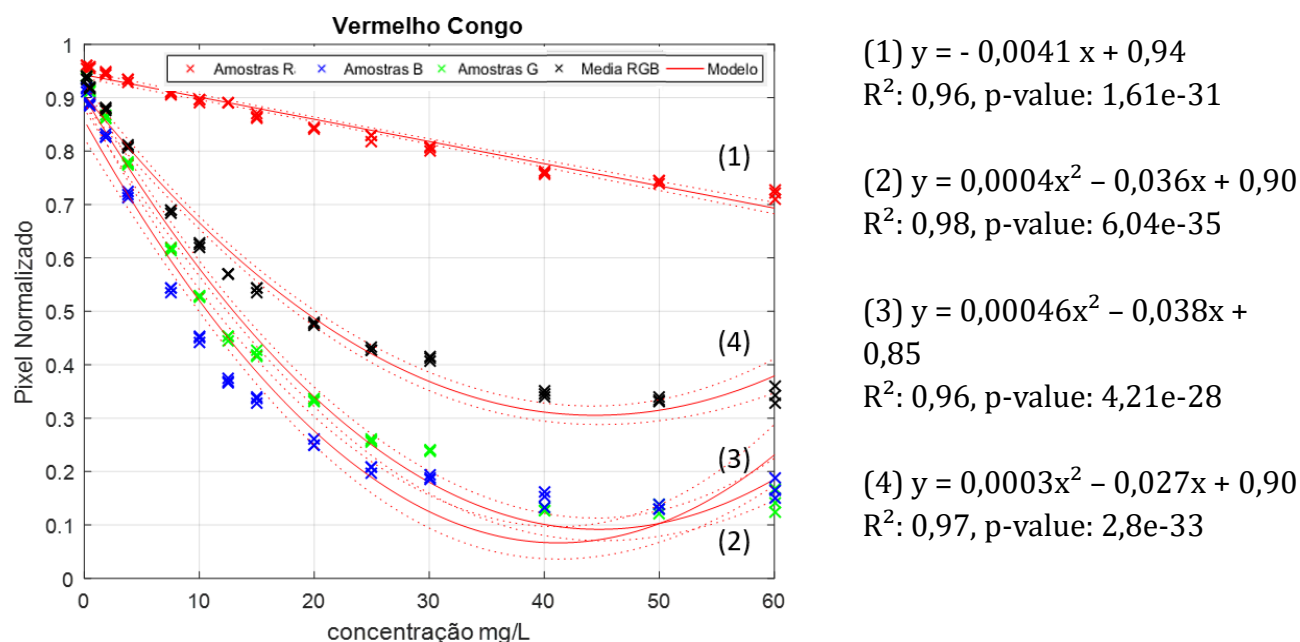
No corante Violeta Cristal (Figura 8), também houve um agrupamento dos valores de pixels entre as mesmas bandas, das amostras de mesma concentração, melhorando a observação dos comportamentos das bandas espectrais R, G e B ao longo das diferentes concentrações. Um fato interessante a se observar nesse corante, é que os maiores valores de pixel foram atrelados à banda B, em seguida, foram os valores da banda R e por último os da banda G, mostrando a sequência decrescente de sua influência espectral. A banda B demonstrou um comportamento mais contínuo até a última concentração testada de 50 mg/L, não evidenciando saturação e se mostrando a mais adequada na detecção das diferentes concentrações do que as bandas R e G. A banda R iniciou a saturação em 25 mg/L e a banda G desde os 12,5 mg/L, demonstrando maior similaridade dos valores de pixels a partir destas concentrações, e consequente, inviabilidade de uso na identificação das maiores concentrações do corante.

Após identificar os benefícios da normalização, decidiu-se ajustar modelos matemáticos significativos e que representasse da melhor forma os dados obtidos. Assim, os gráficos das Figuras 9, 10 e 11, apresentam os modelos matemáticos ajustados para o mesmo conjunto de dados ilustrados pelas Figuras 6, 7 e 8, referentes aos valores de “Pixel Normalizado”, das bandas R, G, e B, para os corantes, Vermelho Congo, Verde Malaquita e Violeta Cristal, respectivamente, ao longo das diferentes concentrações testadas. Além disso, gerou-se em cada figura, para cada corante, valores médios entre as bandas R, G e B, para cada concentração, junto com seu modelo ajustado.

Pela Figura 9, referente ao corante Vermelho Congo, é possível observar que os dados da banda R ajustaram a um modelo de primeiro grau, mostrando um decaimento contínuo dos valores de pixel normalizado até a última concentração testada para esse corante. As demais bandas e a média de RGB ajustaram a modelos de segundo grau, mostrando a

tendência de patamar (saturação) nas últimas três concentrações. Esses comportamentos dos dados já haviam sido relatadas anteriormente, ficando mais visíveis com os ajustes dos modelos.

Figura 9: Modelos matemáticos ajustados a partir dos valores de “Pixel Normalizados” para o corante Vermelho Congo



Para cada banda espectral foi testado inicialmente modelos de primeiro grau, caso o modelo apresenta-se um R^2 inferior a 0,95, ajustava-se o mesmo para segundo grau (quadrático). Essa estratégia foi utilizada para todos os modelos gerados, em todos os corantes e bandas espectrais observadas neste estudo.

As Figuras 10 e 11, representam os dados de Pixel Normalizado, para os respectivos corantes, Verde Malaquita e Violeta Cristal, sendo que ambos apresentaram em todas as bandas RGB e em sua média, modelos ajustados de segundo grau. Nestes dois corantes, a banda B foi a que apresentou os maiores valores de “Pixel Normalizado” para todas as concentrações.

Figura 10: Modelos matemáticos ajustados a partir dos valores de “Pixel Normalizados” para o corante Verde Malaquita

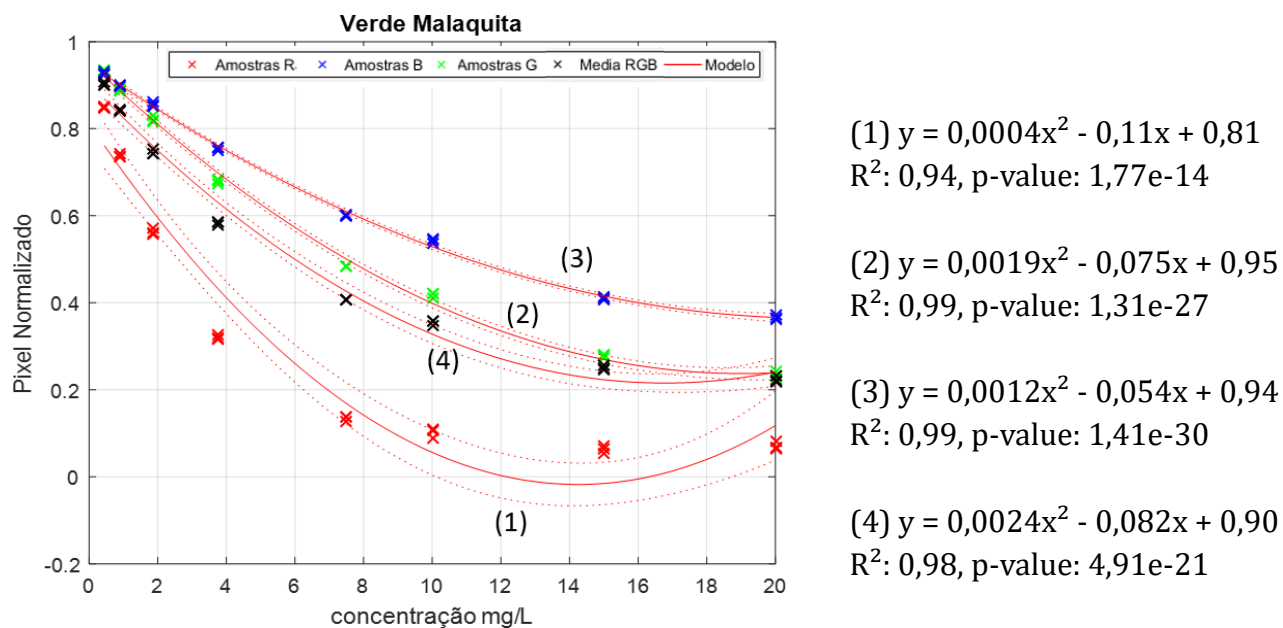
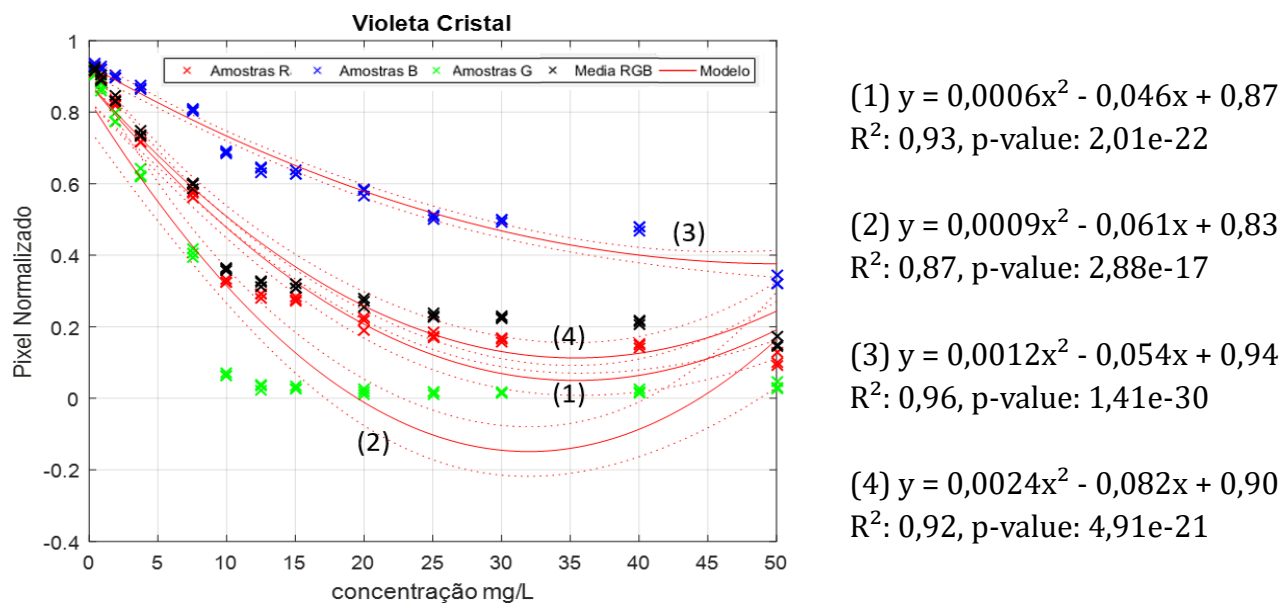


Figura 11: Modelos matemáticos ajustados a partir dos valores de “Pixel Normalizados” para o corante Violeta Cristal



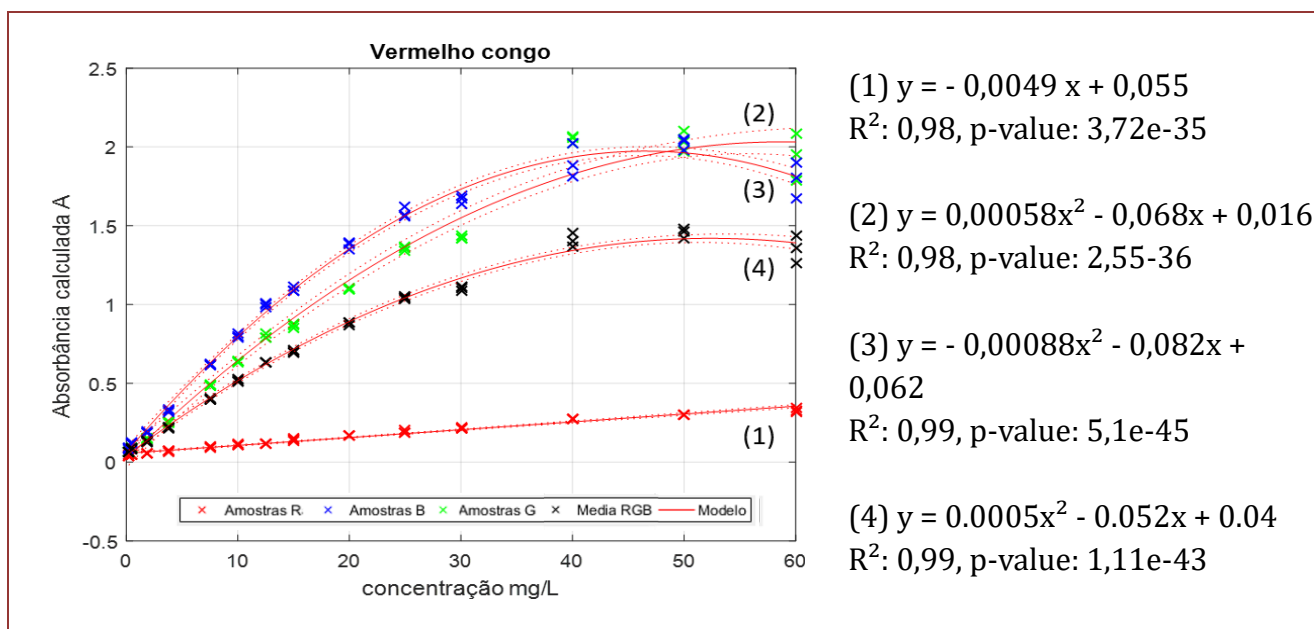
O ajuste de um modelo de primeiro grau indica continuidade dos dados, seja crescente ou decrescente, mas uma mesma tendência para todas as concentrações testadas. Já quando o ajuste é de um modelo de segundo grau, indica mudança de comportamento dos dados com tendência de saturação dos dados em patamares. Esse fato, informa que o modelo de segundo grau, provavelmente encontrará dificuldades em detectar diferentes

concentrações, cujos valores de pixels alcançaram o mesmo patamar. Por isso, o ajuste de modelos de primeiro grau torna-se atrativos e mais interessantes quando o objetivo é utilizá-los para identificarem diferentes concentrações de corantes.

Assim, tanto para o corante Verde Malaquita, quanto para o corante Violeta Cristal observa-se que mesmo tendo ajustado modelos de segundo grau, a banda B obteve melhor distribuição de seus valores de “Pixel Normalizado”, entre as diferentes concentrações, do que as demais bandas espectrais.

As Figuras 12, 13, e 14 apresentam os valores da “Absorbância calculada A”, para todas as três bandas espectrais (RGB) e o valor médio destas, para as diferentes concentrações dos corantes Vermelho Congo, Verde Malaquita e Violeta Cristal.

Figura 12: Modelos matemáticos ajustados a partir dos valores da “Absorbância calculada A”, para o corante Vermelho Congo



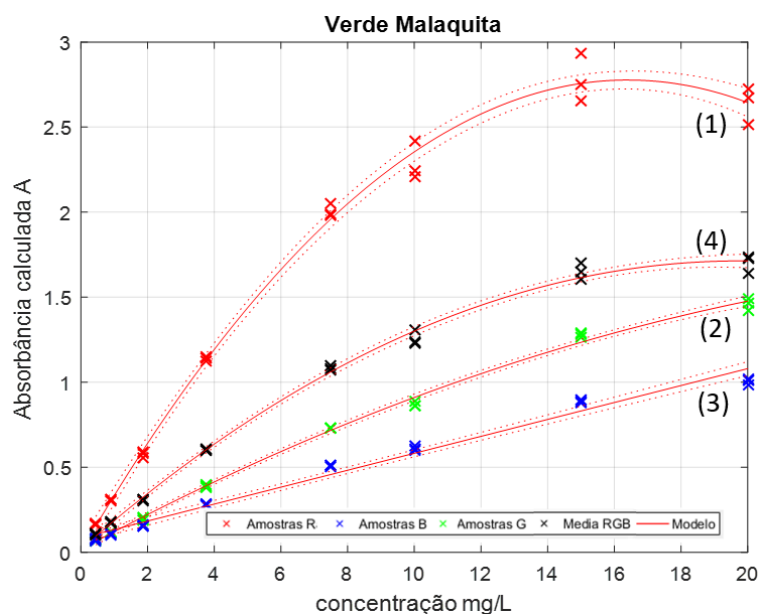
A banda R, no corante Vermelho Congo, com a banda B nos corantes Verde Malaquita e Violeta Cristal ajustaram modelos de primeiro grau, a partir dos valores da “Absorbância calculada A”. Estas bandas espectrais acabam por se destacar das demais e se tornarem as mais adequadas na identificação das diferentes concentrações.

Os modelos matemáticos ajustados utilizando a “Absorbância calculada A”, apresentaram, no geral, uma discreta vantagem em relação aos modelos ajustados a partir dos valores de “Pixel Normalizados”, ao explicar quantitativamente melhor, os comportamentos dos dados, pelos valores de R^2 . Isso sugere que a inserção logarítmica da equação 1, promoveu ganhos na aplicação do processamento das imagens, efetuados neste estudo. Só o corante Violeta Cristal é que apresentou valores menores de R^2 , o que também fora observado anteriormente.

Os valores de média RGB não se mostraram mais eficientes ou diferenciados na detecção das diferentes concentrações para os três corantes testados. Pelo contrário, observou-se que nos três corantes testados, uma tendência da combinação entre as três bandas RGB diluir o potencial detector de concentração, que as vezes apenas uma banda apresentou.

A saturação atingida por uma banda, pode influenciar negativamente a combinação desta com as outras bandas espectrais.

Figura 13: Modelos matemáticos ajustados a partir dos valores da “Absorbância calculada A”, para o corante Verde Malaquita



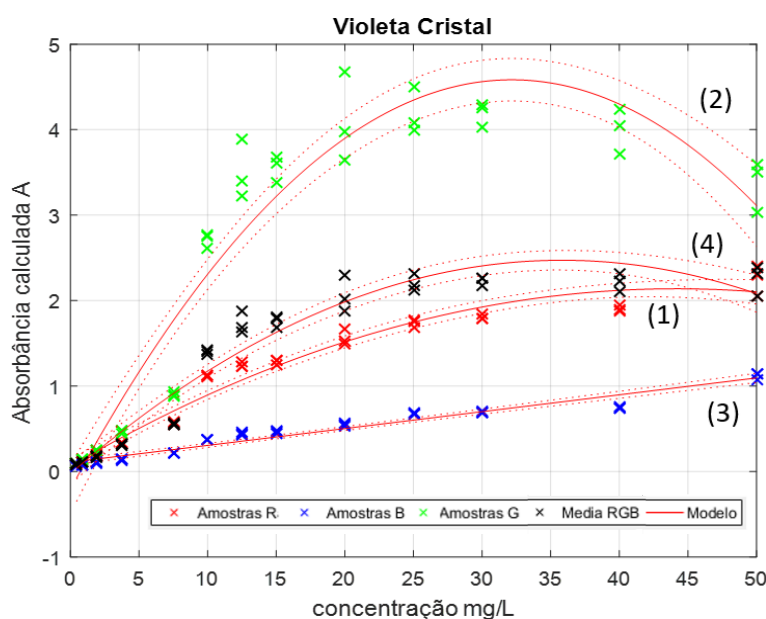
(1) $y = -0,01x^2 + 0,33x + 0,058$
 $R^2: 0,99$, p-value: $4,15e-25$

(2) $y = -0,0016x^2 + 0,10x + 0,016$
 $R^2: 0,99$, p-value: $7,99e-28$

(3) $y = 0,049x + 0,083$
 $R^2: 0,98$, p-value: $5,1e-45$

(4) $y = -0,0043x^2 + 0,17x + 0,019$
 $R^2: 0,99$, p-value: $3,5e-27$

Figura 14: Modelos matemáticos ajustados a partir dos valores da “Absorbância calculada A”, para o corante Violeta Cristal



(1) $y = -0,001x + 0,094x + 0,061$
 $R^2: 0,96$, p-value: $1,79e-27$

(2) $y = -0,046x^2 + 0,29x - 0,20$
 $R^2: 0,93$, p-value: $1,23e-21$

(3) $y = 0,019x + 0,10$
 $R^2: 0,95$, p-value: $7,63e-26$

(4) $y = -0,0019x^2 + 0,13x - 0,025$
 $R^2: 0,94$, p-value: $6,48e-24$

3.1. CORRELAÇÃO DOS DADOS GERADOS PELO PROCESSAMENTO DAS IMAGENS COM ESPECTROFOTÔMETRO

Para avaliar o potencial dos dados gerados pelos processamentos das imagens na detecção das diferentes concentrações dos corantes, utilizou-se o método de correlação de Pearson, que quantifica a relação entre duas variáveis, ou seja, o quanto uma variável influencia a outra. Se uma variável tem relação direta com outra variável, por exemplo, se ao aumentar de valor uma variável, promoverá também o aumento do valor da outra variável, ou o contrário, se uma variável diminuir de valor, promoverá também a diminuição de valor da outra variável, e aí o valor da correlação é considerado positivo. Agora se uma variável tem relação inversa com a outra variável, ou seja, enquanto uma aumenta de valor a outra diminui ou vice-versa, o valor da correlação é considerado negativo.

O método de correlação foi realizado entre as variáveis “Pixel Normalizado” e “Absorbância calculada A”, obtidas pelos processamentos das imagens capturadas, com os valores de “Absorbância medida pelo Espectrofotômetro”, para os três corantes testados neste estudo. Cabe ressaltar que, nos cálculos de correlação, os valores utilizados de “Pixel Normalizado” e da “Absorbância calculada A” foram obtidos pela banda espectral R, no corante Vermelho Congo, e pela banda B, nos corantes Verde Malaquita e Violeta Cristal. Utilizou-se estas respectivas bandas, nesses respectivos corantes, pois estas bandas espectrais se destacaram das demais, nos ajustes dos modelos matemáticos, tornando-se as mais adequadas na identificação das diferentes concentrações. Todos os resultados de correlação estão ilustrados na Tabela 1.

Tabela 1: Correlação entre a Absorbância medida pelo Espectrofotômetro e a Absorbância calculada A e o Pixel Normalizado, para os três corantes testados

Correlação de Pearson	Absorbância medida pelo Espectrofotômetro		
	Vermelho Congo (Banda R)	Verde Malaquita (Banda B)	Violeta Cristal (Banda B)
Absorbância calculada A	0,9912	0,9988	0,9776
Pixel Normalizado	-0,9858	-0,9939	-0,9712

A correlação de Pearson, considera que valores positivos de coeficiente de correlação próximos de (1), indicam uma forte correlação direta entre as variáveis, pois ambas as variáveis aumentam ou diminuem juntas. Já valores negativos de coeficiente de correlação próximos de (-1), indicam uma forte correlação inversa, enquanto uma variável aumenta a outra diminui e vice-versa. Valores próximos a 0 (zero) indicam pouca ou nenhuma correlação.

Pela Tabela 1 é possível observar que os valores de coeficientes de correlação variaram entre 0,97 e 0,99, tanto positivamente, quanto negativamente. Estes valores são considerados muito próximos de (1) e de (-1), o que reforçam os resultados dos modelos matemáticos ajustados anteriormente, demonstrando significativa relação entre as variáveis obtidas pelas imagens digitais, com a variável medida pelo método de referência, o espectrofotômetro. A “Absorbância calculada A” possui forte correlação direta com a “Absorbância Medida pelo Espectrofotômetro” e o “Pixel Normalizado” possui forte correlação inversa.

3.2. TESTE DE VERIFICAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS AJUSTADOS PARA O CORANTE VERMELHO CONGO

Os modelos matemáticos foram construídos por meio de concentrações conhecidas dos corantes diluídos em água (mg/L) e seus respectivos valores obtidos pelos processamentos das imagens, seja usando os valores de “Pixel Normalizado” ou pela “Absorbância calculada A”. Porém, agora, para comprovar o potencial destes modelos matemáticos, decidiu-se utilizá-los na determinação da concentração de corantes, ou seja, de posse do modelo matemático e dos valores calculados pelo processamento das imagens, deseja-se obter a concentração do respectivo corante em mg/L.

Assim, foi realizado um teste com o corante Vermelho Congo, onde foram criadas quatro amostras de concentrações desconhecidas deste corante, diluídas em água. Essas quatro amostras foram colocadas em tubos de ensaios e imagens foram capturadas, processadas, e valores de “Absorbância calculada A” e “Pixel Normalizado” foram obtidos. A banda espectral utilizada nesses cálculos foi a R, devido ao seu melhor desempenho, no referido corante, nas análises anteriores. Estes valores deveriam então serem inseridos nos modelos matemáticos ajustados para valores de “Pixel Normalizado” e “Absorbância calculada A”, pela banda R, nas diferentes concentrações do corante Vermelho Congo, apresentados, respectivamente, nas Figuras 9 e 12, sendo ambos modelos de primeiro grau:

$y = -0,0041x + 0,94$ com R^2 de 0,96 e p-value igual a $1,61e-31$ (Pixel Normalizado)

$y = -0,0049x + 0,055$ com R^2 de 0,98 e p-value igual a $3,72e-35$ (Absorbância calculada A)

Onde os valores de “x” representam os valores das concentrações em mg/L do corante diluído em água, e os valores de “y” representam os valores das variáveis “Pixel Normalizado” e “Absorbância calculada A”. Mas para facilitar a visualização gráfica, decidiu-se inverter o eixo “x” com o eixo “y”, e os valores obtidos pelas quatro amostras foram então inseridos nos novos modelos ajustados, para valores de “Pixel Normalizado” e “Absorbância calculada A”, pela banda R, nas diferentes concentrações do corante Vermelho Congo, apresentados, respectivamente, nas Figuras 15(a) e 15(b), sendo ambos também modelos de primeiro grau:

$y = -232,77x + 220$ com R^2 de 0,96 e p-value igual a $1,61e-31$ (Pixel Normalizado)

$y = 196,52x - 10,564$ com R^2 de 0,97 e p-value igual a $3,72e-35$ (Absorbância calculada A)

Ademais, decidiu-se nesta etapa de verificação dos modelos, ajustar também para estas variáveis (“Pixel Normalizado” e “Absorbância calculada A”) e circunstâncias (banda R do corante Vermelho Congo), modelos de segundo grau (quadráticos), como forma de melhorar o R^2 e observar se ocorreriam melhorias quanto a aproximação dos valores destas variáveis em relação aos observados pelo método de referência com o espectrofotômetro. As Figuras 16(a) e 16(b) apresentam, respectivamente, os modelos matemáticos de segundo grau, ajustados a partir dos valores de “Pixel Normalizado” e “Absorbância calculada A”, para o corante Vermelho Congo, na banda R.

As quatro amostras de concentração desconhecida foram representadas por pontos pretos nos gráficos (a) e (b), dos modelos matemáticos ajustados, das Figuras 15 e 16. Seus valores de “Pixel Normalizado” e “Absorbância calculada A” foram inseridos como valores

de “x” e os modelos forneceram os respectivos valores de “y”(concentração em mg/L), que estão apresentados na Tabela 2.

Figura 15: Modelos matemáticos de primeiro grau, ajustados a partir dos valores de (a) Pixel Normalizado e (b) Absorbância calculada A, para o corante Vermelho Congo, na banda R

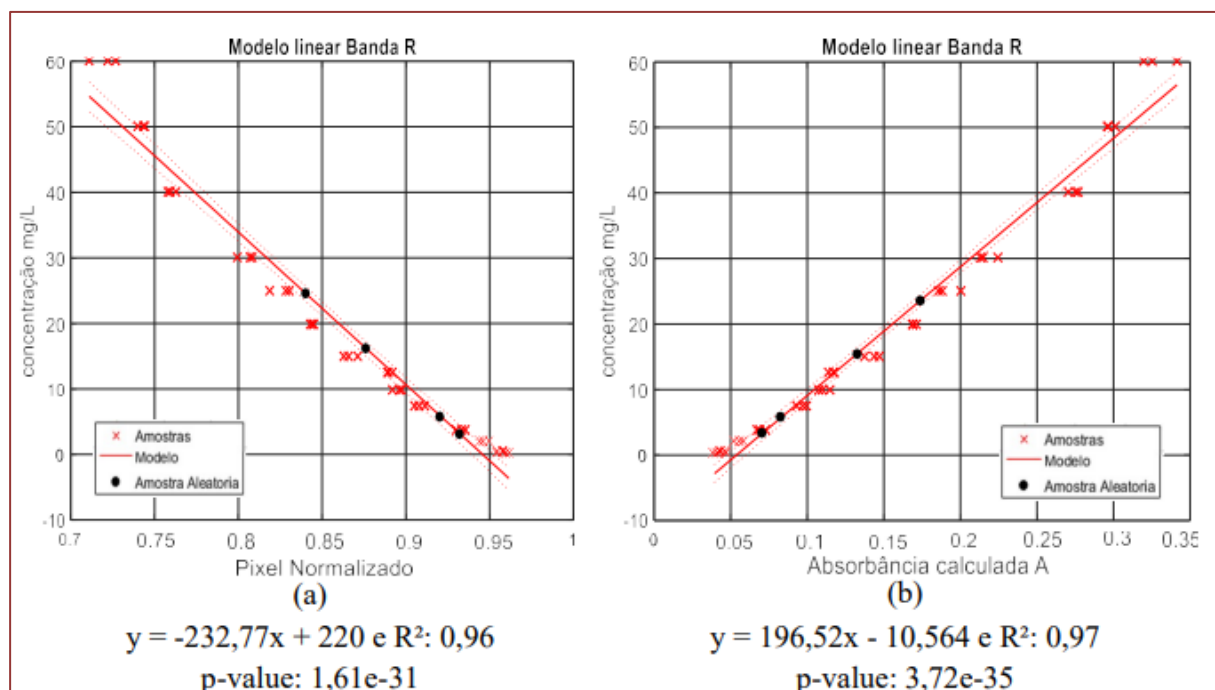
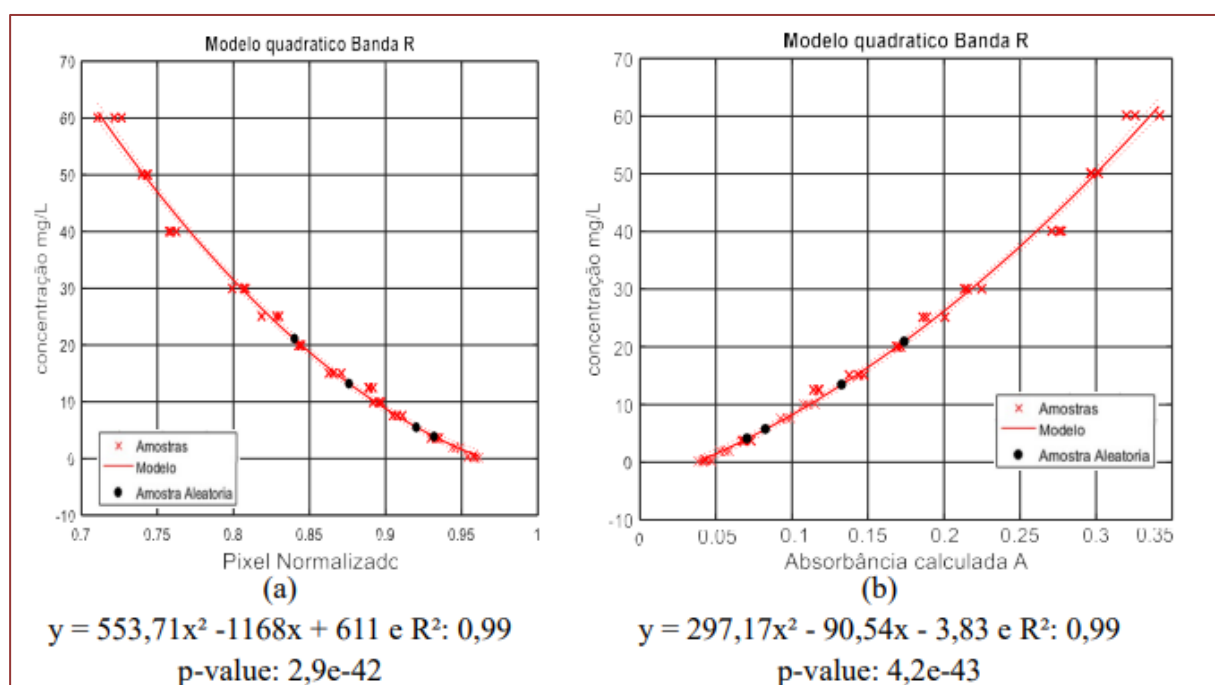


Figura 16: Modelos matemáticos de segundo grau, ajustados a partir dos valores de (a) Pixel Normalizado e (b) Absorbância calculada A, para o corante Vermelho Congo, na banda R



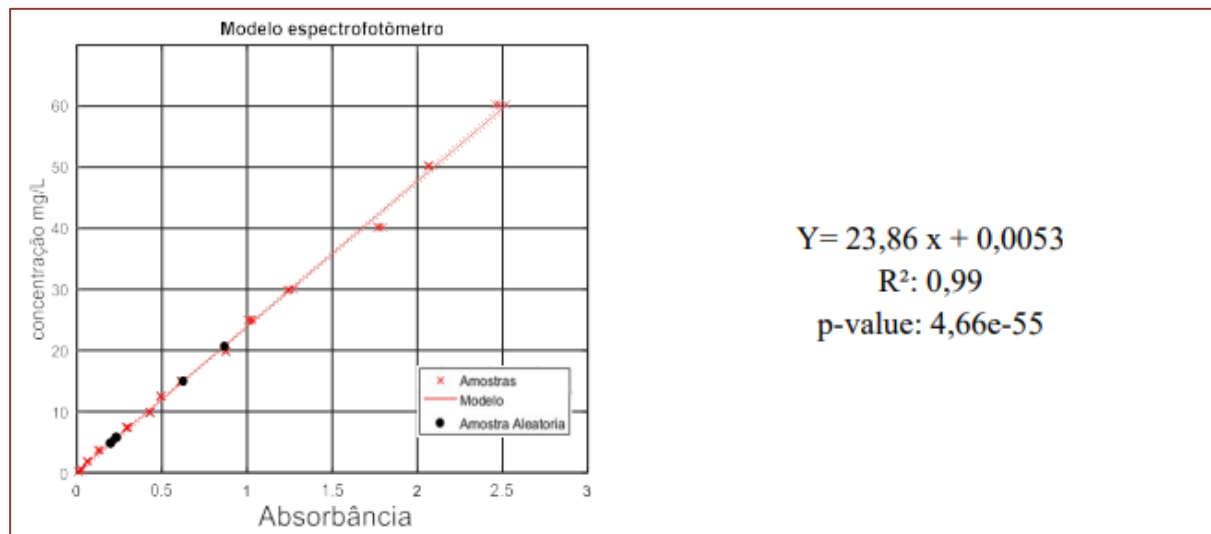
Quando todas as concentrações conhecidas do corante Vermelho Congo estavam sendo criadas e inseridas nos tubos de ensaio, para a captura das imagens, uma pequena porção destas foram depositadas no recipiente do espectrofotômetro, e um valor de “absorbância” era medido pelo equipamento. Assim, para cada amostra gerada, além dos valores de “Pixel Normalizado” e “Absorbância calculada A”, advindos das imagens, também se obteve o respectivo valor de “absorbância” pelo espectrofotômetro. E com isso, um modelo matemático foi ajustado para esta variável, que foi considerada a referência nesse estudo. Tal modelo é apresentado e ilustrado pela Figura 17.

Tabela 2: Valores de concentrações, em mg/L, das quatro amostras desconhecidas, obtidas pelos modelos matemáticos ajustados das variáveis, “Absorbância medida pelo Espectrofotômetro”, “Absorbância calculada A” pelo modelo quadrático, “Absorbância calculada A” pelo modelo linear, “Pixel Normalizado” pelo modelo quadrático e “Pixel Normalizado” pelo modelo linear

Amostra	Absorbância medida pelo Espectrofotômetro	Absorbância calculada A (quadrático)	Absorbância calculada A (linear)	Pixel Normalizado In/Ib (quadrático)	Pixel Normalizado In/Ib (linear)
1	20,767	20,940	23,652	21,037	24,513
2	4,898	4,078	3,366	3,958	3,246
3	5,613	5,738	5,759	5,566	5,871
4	14,968	13,355	15,443	13,236	16,171

É possível notar, analisando a Tabela 2, que os modelos com ajuste quadrático tenderam a apresentar um resultado de concentração mais próximo do resultado obtido através do espectrofotômetro. Isso era de se esperar uma vez que os modelos de segundo grau promoveram o aumento do R^2 , que sugere o quão o modelo representa os dados. Além disso, é possível observar ainda que as variações dos valores de concentração, de cada uma das quatro amostras, variaram relativamente pouco, para todos os modelos matemáticos testados, em comparação com o método de referência. Isso mostra o potencial das imagens nessa seara.

Figura 17: Modelo matemático de primeiro grau, ajustados a partir dos valores da absorvância medida pelo espectrofotômetro, para o corante Vermelho Congo, na banda R



4. CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que é possível detectar os diferentes níveis de concentração dos corantes diluídos em água, utilizando processamento de imagens digitais.

Os modelos matemáticos ajustados e os coeficientes de correlação calculados confirmaram a forte relação existente entre as informações fornecidas pelas imagens, por meio das variáveis “Pixel normalizado” e “Absorvância calculada A”, e os valores de “absorvância medida” produzida pelo espectrofotômetro.

A banda espectral R, no corante Vermelho Congo, e a banda B, nos corantes Verde Malaquita e Violeta Cristal, se destacaram das demais, nos ajustes dos modelos matemáticos, e com isso, foram consideradas as mais adequadas na detecção das diferentes concentrações.

REFERÊNCIAS

- [1] GODINHO MS, PEREIRA RO, RIBEIRO KO, SCHIMIDT F, OLIVEIRA AE, OLIVEIRA SB. Classificação de refrigerantes através de análise de imagens e análise de componentes principais (PCA). Química Nova, v. 31, n. 6, p. 1485-1489, 2008.
- [2] GOMES MS, TREVIZAN LC, NÓBREGA JÁ, KAMOGAWA MY, Uso de scanner em espectrofotometria de absorção molecular: aplicação em experimento didático enfocando a determinação de ácido ascórbico. Química Nova, v. 31, n. 6, p. 1577-1581, 2008.
- [3] GUARATINI CI, ZANONI VB, Corantes têxteis. Química Nova, v. 23, n. 1, 2000.
- [4] KEHOE E, PENN RL, Introducing Colorimetric Analysis with Camera Phones and Digital Cameras: An Activity for High School or General Chemistry. J. Chem. Educ., p. 1191-1195, 2013.

Capítulo 14

An empirical study of beer consumer behavior and market segmentation using clustering techniques

Helenita Rodrigues da Silva Tamashiro

Juliano Endrigo Sordan

Lesley Carina do Lago Attadia Galli

Claudia Rosa Acevedo

Glaucia Aparecida Prates

Valéria Aparecida Martins Ferreira

Hugo Pimentel Tavares

Nilo Antonio de Souza Sampaio

Abstract: Due to the significant economic and social impact of the beer industry on the Brazilian economy, the this aim this paper was to present different segments of beer consumers based on the behavior observed in the purchase decision process. A survey was performed using a sample of 422 respondents. The data were analyzed through clustering techniques such as ward and k-means methods. The results indicated four segments of consumers that were classified as “high engagement consumers”, “average consumption”, “occasional consumers, ” and “low consumption”. The findings of this research may help the beer supply chain actors in the development of strategic marketing actions appropriately for each of the identified clusters.

Keywords: Market segmentation, Consumer behavior, Cluster analysis, Beer sector.

1. INTRODUCTION

Beer Market Size was valued at USD 673.66 billion in 2023. The Beer industry is projected to grow from USD 706.60 Billion in 2024 to USD 1,148.09 billion by 2032, exhibiting a compound annual growth rate (CAGR) of 6.26% during the forecast period (2024 – 2032), according to Market Research Future (2023). The increasing number of consumers turning to low-alcohol and non-alcoholic beer can be attributed to growing health consciousness among consumers who are looking for beverages with lower alcohol content. Additionally, the rising popularity of low-alcohol and non-alcoholic beer can be attributed to changing consumer preferences and the availability of new products in the market (Market Research Future, 2023).

According to Market Research Future (2023), one of the key drivers of the growing demand for low-alcohol and non-alcoholic beer is changing consumer preferences, once many consumers are becoming more health-conscious and are looking for ways to reduce their alcohol intake without sacrificing taste and enjoyment. As a result, they are turning to low-alcohol and non-alcoholic beer as a healthier alternative to traditional beer (Market Research Future, 2023).

Thus, in recent years, Brazil has been highlighted among the main beer markets in the world. According to data from the National Association of the Beer Industry (Sindicerv, 2022), Brazil ranks third in the beer industry, with 13.3 billion liters produced, behind only China (46 billion) and the United States (22.1 billion). In 2020, Brazil reached 1,383 breweries registered with the Ministry of Agriculture, Livestock and Supply (Mapa, 2021), equivalent to an increase of 14.4% compared to the previous year.

The brewing industry represents one of the most relevant sectors of the Brazilian economy, covering many jobs in the country, with more than 2.7 million people employed along the production chain. Its performance moves an extensive network responsible for 1.6% of the gross domestic product (GDP) and 14% of the national manufacturing industry (Cerbrasil, 2022). Faced with the restructuring process of the Brazilian industry, which is characterized by mergers and acquisitions, new brewing industries have emerged in order to make this segment one of the main generators of jobs, taxes, income, social and economic benefits (Visentini; Fenner; Oliveira, 2017).

Two aspects can justify this study. First, we highlight the topic, which is in its infancy in the field of beer consumer behavior. Companies that identify and segment the profile of different groups of consumers will be able to direct their marketing efforts more effectively since the purpose of market segmentation is to characterize the number and nature of consumer groups (Twedt, 1967). Second, as the variety of products and the number of distributors increases, the need to better understand the profile and behavior of consumers throughout the purchase process increases in the same proportion (Verbeke; Viaene, 1999).

This article aims to identify different segments of beer consumers from the behavior observed during the purchase decision process using clustering techniques. In addition, there is a theoretical gap regarding the segmentation of beer consumers using analytical and multivariate techniques since much of the research on beer consumer behavior has addressed more questions related to different brands and customer expectations (Shih-Tse, 2020). The remainder of this paper is structured as follows; the next section presents the theoretical foundation about segmentation and customer behavior. This is followed by a description of the methodological procedures. Section 4 provides the results and

discussion. The conclusion section summarizes the research findings, limitations, and future research.

2. THEORETICAL FOUNDATION

The theoretical framework in a study comprises a critical and organized analysis of the literature relevant to the topic, providing a theoretical contextualization and defining the key concepts.

2.1. MARKETING SEGMENTATION AND CONSUMERS' FOOD PREFERENCES

In a context where market challenges demand that companies adopt marketing strategies more effectively targeted to their audience, understanding customer needs and their significance is crucial to business success (Silva et al, 2025). Thus, market segmentation and product positioning are essential strategies for businesses to enhance their competitiveness, maximize customer satisfaction, and optimize resource allocation (Tokhtasinovna, 2025).

According to Gains (1999), understanding consumers food preferences goes beyond their stated choices, as it is necessary to understand the underlying reasons that justify those preferences. Due to the heterogeneity of consumer behavior, it is essential to identify customer segments and select target markets. Kotler and Keller (2006, p. 237) define a market segment as “a large group of consumers with the same preferences”. These authors warn that the role of marketing professionals is not to create segments but to identify and prioritize the most suitable segments for the organization.

Given its strategic importance, segmentation has become a subject that has aroused several scholars' interest in marketing (Claycamp; Massy, 1968). Segmentation is based on the principle that the market is heterogeneous and composed of specific interest groups, with purchasing capabilities that must first be identified and then served (Dibb; Stern; Wensley, 2002). The underlying principles of market segmentation have been attributed to economic theory pricing, which suggests that discriminatory pricing could maximize profits among different groups of consumers (Stigler, 1942). Thus, market segmentation came to be considered one of the central principles of marketing (Quinn; Hines; Bennis, 2007).

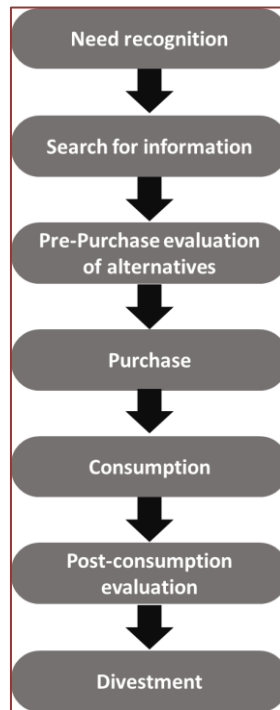
The concept of segmentation has evolved with the advancement of new information technologies and data processing associated with the application of psychographics in the 1970s. It is a technique that combines demographic and psychological factors – and with the geodemographic refinement in the 1980s – allowing to map demographic and psychographic clusters in space and was a key factor for increasingly targeted marketing campaigns (Goss, 1995).

Consumer behavior, in turn, can be defined as the activities related to obtaining, consuming, and disposing of products and services, including the decision-making processes that precede and follow these actions (Blackwell; Miniard; Engel, 2008).

The consumer behavior is a complex process involving the activities of seeking choice, purchase, use, evaluation, and disposal of products and services to satisfy needs, wants, and desires (Tan, 2010). Understanding consumers' needs from the analysis of their buying behavior is relevant because it can provide vital information for managers and marketing professionals regarding decisions related to product development (Kleef;

Trijp; Luning, 2005). The Figure 1 presents a comprehensive consumer decision process (EKB model) proposed by Engel, Kollat and Blackwell (1973).

Figure 1. EKB Consumer Decision Process Model



Source: Blackwell, Miniard and Engel, 2008.

This framework outlines the psychological state of individual purchasers from the point at which they become aware of the possibility of satisfying a material need by purchasing and consuming a product according to their evaluation of that consumption (Longart; Wickens; Bakir, 2016).

Several factors (internal and external) can influence consumers' buying behavior, such as individual differences, environmental influences, social, cultural, personal, and psychological factors (Blackwell; Miniard; Engel, 2008). Generally, consumers are involved in several activities, including buying, consuming, and participating in discussions and sharing knowledge with other consumers (Heinonen, 2011). However, the literature indicates that in the post-purchase stage, the consumer becomes prone to positive or negative advertising of the company and the product, which spreads very quickly due to the ease of communication and information sharing (Kotler; Keller, 2006).

Although it is considered a national preference, beer was produced in Brazil only at the end of the 19th century (Visentini *et al.*, 2016). However, the national beer market has always been characterized by a few brands, predominantly the Pilsen type (Araújo; SilvaMinim, 2003). It is important to note that consumers are constantly exposed to the sensory attributes of products (intrinsic characteristics including alcohol content, origin, novelty, taste, temperature and quality, and extrinsic characteristics such as image, price, added benefits, media, positioning at the point of sale, promotion, availability, packaging, brand, brand origin, convenience, recommendation, and reputation), related to beer,

normally perceived and used as evaluation criteria at the time of consumption (Tagnin; Giraldi, 2013).

Another critical aspect identified by Usunier and Cestre, (2007) indicates that throughout the purchase process, consumers tend to associate some products with a particular country of origin and even with products from different countries. Considering that the consumption of specific products, such as beer, is carried out collectively by a particular social group (friends, family, work or school colleagues), the consumer's purchase decision is often also influenced by the opinion of these groups, that exert a whole social pressure on the individual, called by Ajzen (2006) as subjective norms. The next section presents the attributes of beer consumer perception.

2.2. ATTRIBUTES OF BEER CONSUMER PERCEPTION

Consumer tastes have changed, with a growing desire for imported brands and artisan beers. Import beer brands have increased after 2020, now many global beer brands are on supermarket shelves and in bars, nightclubs and restaurants (Balla, 2024).

Along the same lines, Dalmoro; Fell, (2020) also attest the market construction is a dynamic process involving multiple actors in hegemonic and alternative positions. Multiple market dimensions with each actor constantly implementing new practices without a definitive stabilization occurs in some markets generating great instability.

Thus, in the face of a market with wide competition and a great variety of product brands, as seen in the brewing sector one company is forced to adopt strategies that make it overcome the others in its field, (Visentini *et al.*, 2016).

Consumers are constantly exposed to sensorial attributes of products, which are recommend that one should look upon the fact that consumers are constantly exposed to the sensorial attributes of products, which are intrinsic characteristics (alcohol content, origin, novelty, taste, temperature, and quality) and extrinsic (fame, price, aggregate benefits, media, point of sale positioning, promotion, availability, packaging, brand, brand origin, convenience, recommendation, reputation) related to the beer which is normally perceived and used as evaluation criteria at the time of consumption (Tagnin; Giraldi, 2013). The purpose of the sensory system is the perception of the environment by individuals whose sensations depend on the stimuli to which they are exposed to and activate the five senses: touch, sight, smell, taste, and hearing (Campbell, 2007). The touch corresponds to the perception of the objects, mainly by the skin on the fingers, the palm, the soles of the feet, and the lips (Kandel; Schwartz; Jessel, 2003). Depending on the type of food or beverage, the temperature sensation, which determines whether these are hot or cold, affects consumer choice and consumption.

The function of smell is to promote sensory transduction or transformation in impulses or stimuli through the sensory neurons located in the nasal mucosa. Thus, being able to smell a product through olfactory sensations and determine if it is pleasant influences the choice and the purchase of such a product (Lent, 2004). Still, according to this author, the taste corresponds to the perception of the flavors (sweet, sour, salty and bitter) by the molecules that dissolve in the saliva and give rise to the palate, which in turn allows each person to perceive the taste of the same food or drink in different ways.

The results of a study done by Zuniga *et al.* (1993) have shown that the diversity of individual variations in taste sensitivities in the tongue is explained in part by the

variations in the density of the fungal buds of each individual. For this reason, these authors always believe that gustatory sensitivity is directly related to the distribution density of the drink around each person's mouth. In light of the above, it is thought that capturing consumers' perceptions regarding the taste of their products is essential for companies to implement actions that better meet consumers' preferences.

Another study by (Carbone; Quici, 2020) shown that, overall, Italian consumers appreciate craft beers and are interested in this market. Socio-demographic characteristics impact this inclination but have no significant influence on the results of the choice experiment. Market knowledge, preferences and consumption habits influence consumer spending.

Considering the consumption of certain products, such as beer, is done collectively by a particular social group (friends, family, co-workers, or classmates), the consumer's buying decision is often influenced by the opinion of these groups, which exert all social pressure on the individual (Ajzen, 1991). In this same line (Karsaklian, 2008) points out that the consumer suffers social influence that directly affects the buying and consumption behavior. In this case, Ahmadi and Ataei (2022) believes that brands play a crucial role in establishing connections with consumers, especially as millennials reshape consumption patterns and brand interactions. The next section presents the methodological procedures of the study.

3. METHODOLOGICAL PROCEDURES

This research was structured in two phases. First, an exploratory survey was carried out. This type of study is recommended when seeking to understand the relevance of a specific phenomenon and to describe the distribution of this phenomenon in the population of interest, without the intention of developing a theory (Forza, 2002). While the behavior presented in the beer purchase decision process represented the phenomenon to be investigated, the population of interest was defined as beer consumers in the State of São Paulo.

The questionnaire was structured with 34 questions related to the purchase decision process based on the model developed by Ceribeli, Piovazana and Rocha (2017). The questions were organized so the respondent could indicate a degree of agreement or disagreement with the presented statements. A 7-point Likert scale was used with the variables ordered in relation to the interviewee's agreement with the statements, as explained by Hair *et al.*, (1998). Therefore, each participant was asked to rate each question on a scale of 1 to 7 (1 = fully disagree and 7 = fully agree).

According to Hair *et al.*, (2005), using multivariate statistical techniques to analyze the data collected in a survey should contain a sample of observations between 10 and 20 times the number of variables included in the research. Therefore, it was defined that the sample should consist of at least 340 respondents. The survey was conducted in a convenience sample of 422 respondents, using printed and electronic questionnaires available in the relationship networks of one of the authors of this article.

Next, the data were processed in an electronic spreadsheet, followed by a two-stage cluster analysis, as suggested by Punj and Stewart (1983). In the first stage, the analysis of hierarchical clusters was performed using the Ward method with a squared Euclidean distance measure without data standardization. Then, a second analysis of clusters was carried out using the k-means method to assess the stability of the groups formed between the two solutions, using Cramer's V contingency coefficient, a measure of association between nominal variables.

The discriminant analysis technique was used as a form of internal validation of the groups, with the cluster membership as the dependent variable and the 34 questions on purchasing behavior as the independent variables. External validation was carried out through the practical verification of the groups formed, based on Kruskal's H statistic, used as a reference to identify the variables that best discriminated the groups. Finally, chi-square tests were used to assess the relationships between the groups formed and the demographic variables of the respondents.

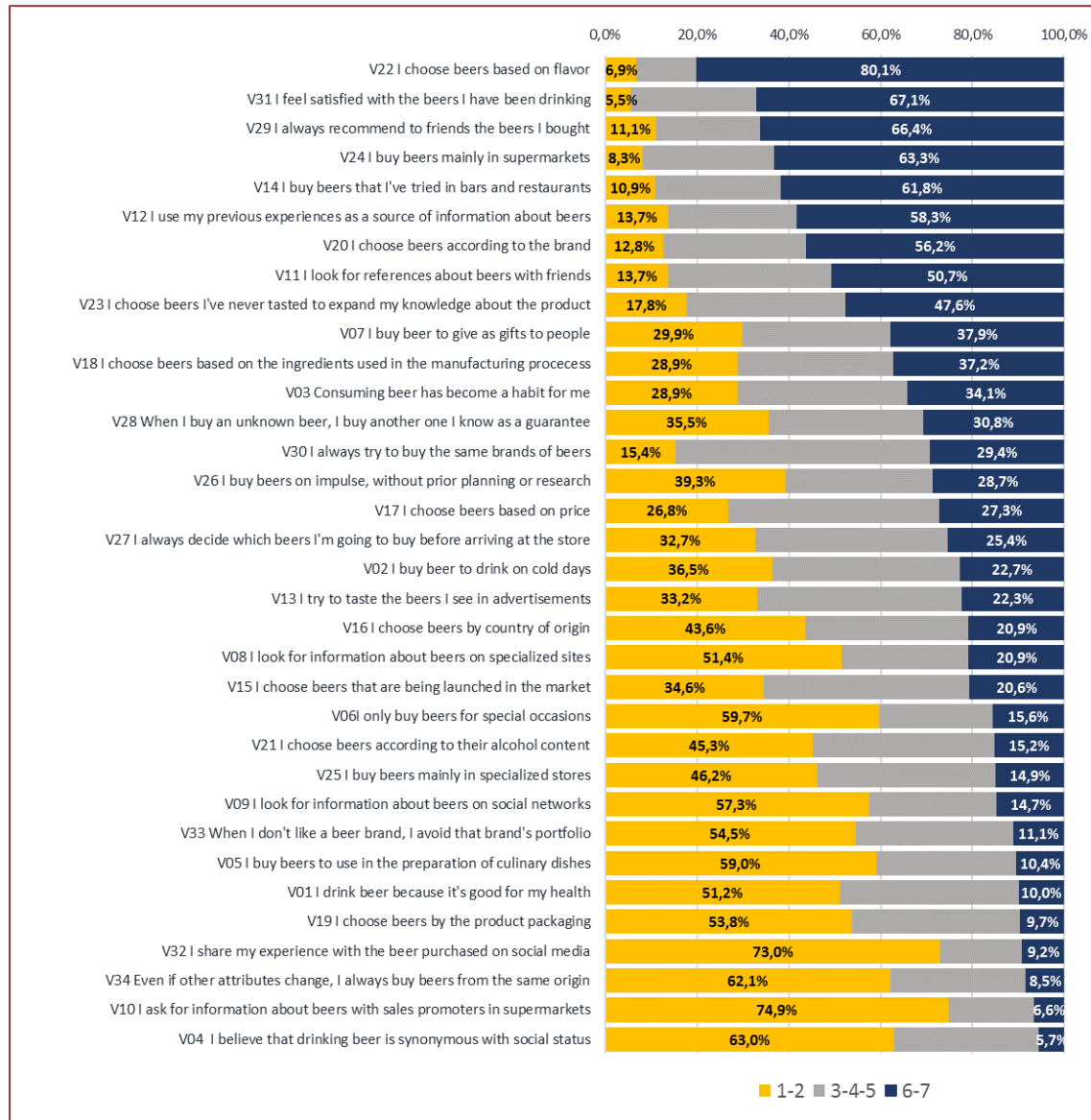
4. RESULTS AND DISCUSSION

4.1. SAMPLE DESCRIPTION

The final sample composed of 422 completed forms indicates that the respondents are predominantly male (54.7%), with the majority married (57.3%) and without children (49.3%), of relatively mature age (66.1% are between 31 and 59 years old, against 30.5% of young people up to 29 years old) and with a high level of education (73.2% have completed higher education). Figure 2 depicts the bar graph with the frequency of responses in each of the 34 questions on buying behavior, grouped into 3 ranges of scores on the 7-point scale: lower range (between 1 and 2 points), intermediate range (from 3 to 5 points); and upper range (between 6 and 7 points).

There is a high level of satisfaction among respondents concerning the beers consumed (average 5.7), which has already become a habit for many consumers (4.2). Regarding the criteria for choosing the beers, the following variables stand out with the highest averages: flavor (6.1), brand (5.2), experimenting with new flavors (4.9), ingredients used in manufacturing (4.2), and drink price (4.0). Supermarkets (5.5) are notably the preferred purchase channel from specialized stores (3.1).

When observing the graph in Figure 2, the influence of word-of-mouth marketing among friends can be seen by indicating beers that consumers have tried and enjoyed (5.6), or even by searching for references about beers (5.0). The results suggest that the purchase of beers is influenced by trying products in bars and restaurants (5.4) and previous experiences (5.24). It is important to observe that drinking beer, for most respondents, is not considered a social status behavior (2.35). In addition, it should be noted that the use of beer to prepare culinary recipes (2.65), the dissemination of experiences with beers on social networks (2.2), and the search for information about beers with supermarket promoters (2.01) were identified as the least frequent behaviors.

Figure 2 - Frequencies obtained about beer consumer behavior

Source: Research data.

for the defined number of 4 groups and having as initial seeds the centroids of the groups resulting from the preliminary analysis of the previous stage (hierarchical method). The outputs of this analysis are summarized in Table 1.

Table 1. Comparison between the elements of the groups

K-means	Ward					Total
		1	2	3	4	
	1	134	25	0	0	159
	2	17	150	29	0	196
	3	0	2	42	1	45
	4	0	0	2	20	22
Total		151	177	73	21	422

Source: research data.

To verify the external validity, the Kruskal-Wallis test was used. This procedure identified the variables that best discriminated the groups and in which of them the differences were occurring. To facilitate the analysis, the variables were classified in descending order. Table 2 presents the measures used for segmenting the beer consumer groups, including the Kruskal-Wallis statistics (H) and its significance (Sig), as well as the mean value of each group for each variable that measured the behavior beer purchase.

Table 2. Measures used for clustering

Categories	Variables	H Test	Sig.	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4	Average
Search for information	V08	236,031	0,000	5,391	2,232	1,397	1,238	3,168
	V09	177,374	0,000	4,649	2,079	1,438	1,048	2,836
	V12	175,871	0,000	6,305	5,701	3,110	1,190	5,244
	V11	165,188	0,000	6,192	5,226	3,219	1,238	5,026
	V13	135,294	0,000	4,960	3,689	2,123	1,095	3,744
	V10	63,618	0,000	2,854	1,751	1,370	1,048	2,045
Word of mouth marketing	V29	145,621	0,000	6,424	6,096	3,795	1,333	5,578
	V32	79,704	0,000	3,106	1,757	1,479	1,048	2,156
Selection and experimentation criteria	V23	173,328	0,000	6,192	5,056	2,548	1,619	4,858
	V15	157,731	0,000	4,907	3,605	1,767	1,190	3,633
	V18	155,277	0,000	5,616	4,124	2,247	1,190	4,187
	V16	147,544	0,000	4,987	2,723	2,205	1,048	3,360
	V22	108,945	0,000	6,689	6,458	5,315	1,476	6,095
	V14	106,521	0,000	6,238	5,667	4,301	1,095	5,408
	V19	68,629	0,000	3,556	2,638	1,767	1,333	2,751
	V30	65,600	0,000	4,325	4,746	5,288	1,238	4,514
	V21	63,008	0,000	3,861	3,226	2,137	1,143	3,161
	V20	59,736	0,000	5,563	5,475	4,932	1,238	5,201
	V17	43,020	0,000	3,927	4,412	3,973	1,190	4,002
Distribution channel	V25	137,672	0,000	4,490	2,627	1,918	1,381	3,109
	V24	45,128	0,000	5,781	5,808	5,466	1,762	5,538
Purchase on occasion / special purchase	V07	125,034	0,000	5,656	4,045	2,425	2,143	4,246
	V02	98,225	0,000	4,781	3,452	2,411	1,429	3,647
	V05	38,380	0,000	3,457	2,266	2,041	2,095	2,645
	V06	9,496	0,000	2,291	2,876	3,041	2,381	2,671
Impulsivity	V26	42,167	0,000	4,026	4,068	2,781	1,429	3,699
	V27	35,459	0,000	3,987	3,932	3,959	1,190	3,820
Buying attitudes and behavior	V03	106,816	0,000	5,305	4,181	2,712	1,095	4,175
	V31	63,591	0,000	6,159	5,904	5,438	1,524	5,697
	V28	59,150	0,000	4,298	4,249	2,849	1,143	3,870
	V34	39,767	0,000	3,060	2,237	2,452	1,095	2,512
	V01	36,843	0,000	3,411	2,684	2,178	1,524	2,799
	V33	27,740	0,000	3,013	2,712	2,918	1,095	2,775
	V04	21,408	0,000	2,589	2,446	1,836	1,619	2,351

Source: Research data.

Table 3 shows the grouping of beer consumers into four distinct profiles: high involvement, medium consumption, occasional buyers, and low consumption. Such groups were compared to demographic variables in chi-square tests, showing that only age (p-value = 0.009) and education (p-value = 0.001) variables were statistically significant ($\alpha=0.05$). By comparing the observed frequencies *versus* the expected frequencies, we noticed that group 1 (high involvement) has a more senior public proportionally (31 over 60 years) with a higher level of education (university degree).

The cluster identified as “average consumption”, in turn, is characterized by having a younger profile (less than 21 to 30 years old) and higher education (incomplete and complete higher education). Cluster 3 (occasional consumers) has a larger proportion of middle-aged consumers (31 to 40 years old) with low education (primary and secondary education). Finally, the last cluster (low consumption) covers consumers over 60 with less education (primary and secondary education).

Table 3. Description of clusters

Clusters	Description
High involvement (36%)	Consumers who most seek information, whether information on specialized websites (5.39), on social networks (4.65), or with friends (6.20) and often indicate beers they enjoyed to friends (6.19). They share their experiences (good or bad) on social networks (3,11). These consumers are trying out new brands: they choose beers they have never tasted to expand their knowledge about the product (6.19), are pioneers in choosing beers that are being launched on the market (4.90), and try to know beers they see in advertisements (4.96). They use previous experiences as a source of information about beers (6.31) and choose beers considering: flavor (6.69); ingredients used in manufacturing (5.62); mark (5.63); and origin (4.99). For this group of consumers, price represents a secondary choice criterion (3.93). On the other hand, these consumers are most likely to buy beers for gifts (5.66) and culinary purposes (3.46). As for the consumption channel, they buy beer mainly in supermarkets (5.78) and specialized stores (4.49). Finally, it is notably consumers with the highest consumption habits (5.31) and the most satisfied (6.16) with the beers they consume.
Average consumption (42%)	Consumers in this group seek information and references about beers based on previous experiences they had (5.70) and information provided by friends (5.23), to whom they also indicate beers they bought and liked (6.10). They also choose beers based on flavor (6.46) and brand (5.48), in addition to trying new beers to expand their knowledge (5.06). The price of beer (4.41) is very relevant for these consumers who tend to buy the same beers (4.75), mainly in supermarkets (5.81). Occasionally, these consumers buy beer to give to friends and relatives (4.05). They are satisfied consumers (4.18) and have a relative beer consumption habit (5.90).
Occasional consumers (17%)	Occasional consumers are those who do not usually search for information about beers, whether on websites (1.40), social networks (1.44), or even with friends (3.22). They also do not have the habit of tasting new beers to expand their knowledge (2.55) or trying beers that are being launched (1.77). This cluster covers consumers who typically buy the same beers (5.29) and, basically, in supermarkets (5.47) and specialized stores (1.92). The flavor (5.32) and brand (4.93) criteria are considered the most important. Although they are satisfied with the beers they consume (5.44), beer consumption is not a habit for this group (2.71), with beer being the most purchased for consumption on special occasions (3.04).
Low consumption (5%)	This cluster encompasses the consumers who do not have the habit of drinking beer (1,10) and are not very involved in the buying process. They usually do not seek information about beer or do any word-of-mouth marketing. They usually buy beers for special occasions (2.38), to give as gifts to people (2.14), and to use in the preparation of culinary dishes (2.10).

Source: Data Research.

5. RESULTS AND DISCUSSION

This paper identified and provided a synthesis regarding different clusters of beer consumers in the State of São Paulo based on the behavior presented during the purchase decision process. The results of the quantitative analysis using clustering techniques suggest that the explored variables reflect beer consumption behavior and reveal four groups of consumers.

The high involvement cluster encompasses consumers who seek, disseminate and share information and experiences related to beer consumption. Such consumers also seek to find new products where the price is a secondary criterion in the purchase decision process. This type of consumer fits the idea of product experience discussed by Hernández-Mora *et al.*, (2002), who consider that the search for new experiences has been increasing considerably in the beer market. These authors warn that the preference and diversity of products have been evolving, making this consumer behavior more complex in their interaction with a product.

The second cluster (average consumption) is limited to previous experiences and the opinion of friends and other social groups. Despite presenting some similarities with the characteristics of the first cluster, these consumers seem more sensitive to prices. On the other hand, consumers in the third group (occasional buyers) were less involved with the purchase process and with a profile less adept at seeking out new flavors or new brands. Finally, the fourth group (low consumption) includes consumers whose beer consumption is not a habit since it usually occurs on special occasions.

Market segmentation is an important management tool as it can detect new market opportunities and direct marketing efforts to buyers who are more likely to have their needs met. Furthermore, as Mittal and Kamakura (2001) reported, consumers with different characteristics have different thresholds and repurchase probabilities. The managerial implication of this research refers to the opportunity to identify different consumer profiles in the beer market since managers and marketing practitioners can find subsidies for producers and distributors to develop specific marketing actions appropriately for each identified segment.

This work's main limitation is its geographic scope, which is restricted to consumers in the State of São Paulo. For future studies, it is suggested that this study be replicated in other regions of the country, allowing the comparison of the results obtained. It is also suggested that other segmentation bases, such as demographic and psychographic, be used to identify the different groups of consumers in the sector analyzed here in order to compare the results with those obtained in this research.

REFERENCIAS

- [1] AJZEN, I. The theory of planned behavior. **Organizational Behavior and Human Decision Process**, v. 50, p. 179-211, 1991.
- [2] AHMADI, A.; ATAELI, A. Emotional attachment: A bridge between brand reputation and brand advocacy. **Asia-Pacific Journal of Business Administration**, v. 16, n. 1, p. 1-20, 2022.
- [3] ARAÚJO, F.B.; SILVA, P.H.A.; MINIM, V.P.R. Perfil sensorial e composição físico-química de cervejas provenientes de dois segmentos do mercado brasileiro. **Revista Ciências Tecnológicas**, v. 23, n. 2, p. 121-128, 2003.
- [4] BALLA, E. Consumer attitude on beer brand choice: A study in Albanian Market. In: **WOC - World of Conferences**, XIV international scientific conference. Vienna. Anais. Vienna, Austria, 28-29.11.2024, p.

18-22.

- [5] BLACKWELL, R. D.; MINIARD, P. W.; ENGEL, J. F.; **Comportamento do consumidor**. São Paulo: Cengage Learning, 2008.
- [6] CERVBRASIL. **O mercado cervejeiro**. available at:<http://www.cervbrasil.org.br/novo_site/mercado-cervejeiro/>. accessed at: 4th, March, 2022.
- [7] CERIBELI, H. B.; PIOVEZANA, G. V.; ROCHA, G. B. S. Uma proposta de segmentação dos consumidores no setor de vinhos. **Tekhne e Logos**, v. 8, n.4, 2017.
- [8] CLAYCAMP, H. J.; MASSY, W. F. A Theory of Market Segmentation. **Journal of Marketing Research**, v. 5, n. 4, p. 388-394, 1968.
- [9] DIBB, S.; STERN, P.; WENSLEY, R. Marketing knowledge and the value of segmentation, **Marketing Intelligence and Planning**, v. 20, n. 2, p. 113-119, 2002.
- [10] HAIR, J. F., JR. *et al.* **Multivariate data analysis** (5th ed.). Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 1998.
- [11] HAIR, J. F., JR. *et al.* **Fundamentos de métodos de pesquisa em administração**. Porto Alegre: Bookman, 2005.
- [12] HERNÁNDEZ-MORA, Y. N.; VERDE-CALVO, J. R.; MALPICA-SÁNCHEZ, F.P.; ESCALONA-BUENDÍA, H. B. Consumer Studies: Beyond Acceptability—A Case Study with Beer. **Beverages**, 8, 80, 2022.
- [13] FORZA, C. Survey research in operations management: a process-based perspective. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 152-194, 2002.
- [14] GAINS, N. The repertory grid approach. In: MACFIE; THOMSON. **Measurement of food preferences**. London: Chapman & Hall, 1999.
- [15] GOSS, J. We Know Who You Are and We Know Where You Live: The Instrumental Rationality of Geodemographic Systems. **Economic Geography**, v. 71, n. 2, p. 171-98, 1995.
- [16] HEINONEN, C. Consumer activity in social media: Managerial approaches to consumers' social media behavior. **Journal of Consumer Behaviour**, v. 10, p. 356-364, 2011.
- [17] KLEEF, E.; TRIJP, H.; C. M.; LUNING, P. Consumer Research in The Early Stages of New Product Development: a critical review of methods and techniques. **Food Quality and Preference**, v. 16, p. 181-201, 2005.
- [18] KOTLER, P.; KELLER, K.L. **Administração de marketing**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2006.
- [19] LONGART, P.; WICKENS, E.; BAKIR, A. Consumer decision process in restaurant selection: an application of the stylized ekb model. **Trziste/Market**, v. 28, n. 2, p. 173-189, 2016.
- [20] MAPA. **Mercado cervejeiro cresce no Brasil e aumenta interesse pela produção nacional de lúpulo e cevada**. Disponível em:<<https://www.gov.br/pt-br/noticias/agricultura-e-pecuaria/2021/08/mercado-cervejeiro-cresce-no-brasil-e-aumenta-interesse-pela-producao-nacional-de-lupulo-e-cevada>>. Acesso em: 20 março, 2022.
- [21] MARKET RESEARCH FUTURE (August, 2023). Global Beer Market . available at:<https://www.marketresearchfuture.com/reports/beer-market-1647?utm_term=&utm_campaign=&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=2893753364&hsa_cam=19912237177&hsa_grp=148712481999&hsa_ad=659589502539&hsa_src=g&hsa_tgt=dsa-2081392600071&hsa_kw=&hsa_mt=&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gad_source=1>. accessed at: 4th January, 2025.
- [22] MITTAL, V.; KAMAKURA, W.A. Satisfaction, repurchase intent, and repurchase behavior: Investigating the moderating effect of customer characteristics. **Journal of marketing research**, v. 38, n. 1, p. 131-142, 2001.
- [23] PUNJ, G.; STEWART, D. W. Cluster Analysis in Marketing Research: Review and Suggestions for application. **Journal of Marketing Research**. V. XX, p. 134-48, 1983.
- [24] QUINN, L.; HINES, T.; BENNISON, D. Making sense of market segmentation: a fashion retailing case. **European Journal of Marketing**, v. 41, n. 5/6, p. 439-465, 2007.
- [25] SHIH-TSE, W. E. Hypotheses for the Reasons behind Beer Consumer's Willingness to Purchase

Beer: An Expanded Theory from a Planned Behavior Perspective. **Foods**, v. 9, n. 1842, p. 1-11, 2020.

[26] SILVA, D. S.; LITAYFF, M. F. P.; BRUCIO, V. L. D.; ROBERTO, J. C. A.; PINTO JUNIOR, J. R. Marketing estratégico para empresas de transporte: um estudo aplicado à Tucuxi Táxi. **REVISTA CADERNO PEDAGÓGICO** – Studies Publicações e Editora Ltda., Curitiba, v.22, n.6, p. 01-22. 2025.

[27] SINDICERV. **Vendas de cerveja crescem 7,7% em 2021**. Disponível em: <<https://www.sindicerv.com.br/noticias/vendas-de-cerveja-crescem-77-em-2021/>>. Acesso em: 20 março, 2022.

[28] STIGLER, G. **The theory of price**. MacMillan, London, 1942.

[29] TAGNIN, A. C.C.N.; GIRALDI, J.M.E. Atributos do produto valorizados no processo de decisão de compra de cerveja: um estudo qualitativo com universitários. **Produto & Produção**, v. 14 n. 1, p.84-106, 2013.

[30] TAN, C.S. Understanding Consumer Purchase Behavior In The Japanese Personal Grooming Sector. **Journal of Yasar University**, v. 17, n. 5, p. 2821-2831, 2010.

[31] ABDUKHALILOVA LAYLO TOKHTASINOVNA. Market Segmentation and Product Positioning in Competitive Markets. **International Journal of Scientific Trends- (IJST)**, v 4, Issue 2, p. 72-76, February, 2025.

[32] TWEDT, D. W. How does brand awareness-attitude affect marketing strategy? **Journal of Marketing**, v. 31, p. 64-66, 1967.

[33] USUNIER, J. C.; CESTRE, G. Product Ethnicity: Revisiting the Match between Products and Countries. **Jornal de Marketing Internacional**, v. 15, n. 3, p. 32-72, 2007.

[34] VERBEKE, W.; VIAENE, J. Beliefs, attitude and behaviour towards fresh meat consumption in Belgium: Empirical evidence from a consumer survey. **Food Quality and Preference**, v. 10, n. 6, p. 437-445, 1999.

[35] VISENTINI, M. S.; FENNER, V. U.; OLIVEIRA, D. Análise da associação entre a imagem da mulher em comerciais de cerveja e o comportamento de compra dos consumidores. **Revista Ciências Administrativas**, v. 23, n. 3, p. 431-445, 2017.

Capítulo 15

Estudos dos riscos x acidentes no bloco de pesquisa

Fabio Cezar Ferreira

Rafael Misael Vedovatte

Resumo: Este estudo concentra-se em verificar as conformidades do Bloco (L) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná com as normas reguladoras de segurança do trabalho. Para isso foi aplicado um questionário aos usuários do bloco para a elaboração de um mapa de risco e um checklist para verificar as NR pertinentes ao espaço. Com base nos resultados obtidos foi possível avaliar as deficiências do bloco e assim sugerir a elaboração de um manual de boas práticas e um mapa de risco para os usuários do bloco a fim de informá-los como se comportar e proceder em situações de risco.

Palavras-chave: Segurança do Trabalho, Mapa de Risco, Questionário.

1. INTRODUÇÃO

Este Trabalho concentra-se na avaliação do Bloco de pesquisa de uma universidade federal. Com base na aplicação de conceitos de segurança do trabalho, foi verificado as conformidades do bloco com a legislação vigente. Almeja-se, ainda, abordar noções de segurança em laboratórios científicos e os riscos a eles associados.

Usuários do bloco de pesquisa estão expostos, sobretudo, a riscos físicos, químicos, pois transportam e manipulam materiais químicos, utilizam vidrarias diversas, materiais cortantes e até mesmo passam por stress resultante de longos períodos de estudo, rotinas repetitivas e, em muitos casos, sob pressão de prazos de entrega de resultados. Todos esses fatores contribuem para elevação dos riscos associados a esse ambiente e, consequentemente, ao aumento da ocorrência de acidentes.

A Organização Mundial de Saúde (OMS) define a saúde como: “Um estado de completo bem-estar físico, mental e social, e não meramente a ausência de doença”. Um ambiente de trabalho saudável define-se, então, como aquele em que todos colaboram para o uso de um processo de melhoria contínua da proteção e do acesso da segurança, saúde e para a sustentabilidade desse espaço (OMS, 2010). Proporcionar ambientes seguros de trabalho, assim como a realização de treinamentos de segurança, contribui para a conscientização e capacitação necessárias para os colaboradores desempenharem suas funções de forma organizada, evitando exposição a riscos. Treinamentos e normatizações padronizam funções, corrigem eventuais falhas e, principalmente, evitam acidentes de trabalho.

A utilização de metodologias que permitam determinar e quantificar riscos presentes em um ambiente laboral são relevantes no sentido de buscar eliminar ou pelo menos atenuar riscos. As normas regulamentadoras elaboradas pelo Departamento de Segurança e Saúde no Trabalho, do Ministério do Trabalho e Emprego são principais requisitos e procedimentos para o bom uso de tais metodologias e adequações de ambientes de trabalho. Entre estas encontram-se a elaboração de mapas de risco, realização de questionários e manual de boas práticas.

Todos os riscos não previstos, ou não controlados, podem acarretar acidentes de trabalho. Quando a atividade envolve a manipulação de agentes químicos ou equipamentos com riscos desconhecidos, o pesquisador pode estar exposto a riscos ainda mais graves. Portanto, a primeira atitude deve ser a prevenção, conhecendo o ambiente de trabalho, materiais e processos.

Estima-se que dois milhões de pessoas atualmente morrem a cada ano como resultado dos acidentes de trabalho e de doenças ou lesões relacionadas ao trabalho (OMS, 2010). O entendimento dos riscos associados ao ambiente e às atividades leva a um aumento da qualidade de vida no trabalho. A partir desse conhecimento, o próprio colaborador pode utilizar esse espaço de forma propícia ou até mesmo reavaliar a estrutura física.

Além do ambiente, outros fatores devem ser considerados a fim de prevenir riscos e acidentes. Um manual de boas práticas que aborde também a conduta correta em relação aos procedimentos e aos materiais pode colaborar para redução dos riscos, o que contribui para a segurança de todos os usuários do bloco. Conscientizar sobre atitudes corretas durante um acidente ou situação emergencial agiliza os processos de atendimento, assim, os próprios usuários podem detalhar com mais precisão às unidades de socorro, se esse for o caso.

A segurança do trabalho visa a uma consciência coletiva, o que significa mostrar aos colaboradores a importância de pensar em como a sua atividade individual influencia tanto o seu ambiente como as atividades dos demais que compartilham desse espaço.

Diante disso, conscientizar os usuários do bloco Central de Pesquisas dos riscos a acidentes os quais estes estão submetidos. Assim os usuários não apenas trabalharão para obter dados de relevância científica, mas também para contribuirão com a segurança de todos que utilizam o bloco.

2. OBJETIVOS

Avaliar e orientar, com base nos conceitos e normas regulamentadoras de segurança do trabalho, no Bloco de Pesquisa da Universidade Tecnológica Federal do Paraná com foco nos riscos aos quais os usuários estão submetidos.

3. JUSTIFICATIVA

Com a utilização desta metodologia de pesquisas e análise em campo, espera-se que através dos dados informados e conteúdos bibliográficos, sejam realizados estudos e levantamentos para que os riscos à saúde sejam identificados e sanados. A avaliação dos riscos pode evitar situações de desenvolvimento de doenças ocupacionais como também a ocorrência de acidentes de trabalho.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As referências utilizadas para a elaboração desse estudo abordam temas como o ambiente de trabalho, em específico laboratórios; riscos nele presentes; avaliação e gerenciamento de riscos; normas regulamentadoras e os conceitos principais acerca de segurança do trabalho.

4.1. LABORATÓRIOS

Laboratório pode ser definido como local ou sala especial de trabalho, experimentação e investigações científicas, equipada com aparelhagem específica para pesquisa e experimentos (Michaelis, 2017). Em uma instituição de ensino, o laboratório é o lugar que apresenta, potencialmente, os maiores riscos. Por isto, é exigida a máxima atenção durante a realização das atividades. Em relação à disposição física, não existe um padrão de laboratório. Cada um deve ser planejado de acordo com as atividades experimentais e os recursos disponíveis. Sua estrutura deve atender às normas de regulamentadoras, apresentar uma boa distribuição do espaço, uma armazenagem correta dos reagentes, instalação correta dos equipamentos entre outros (Pino; Krüger, 1997). Entretanto, a prevenção de acidentes não pode ser garantida apenas com esses fatores.

Para Pino e Krüger (1997), ao projetar um laboratório é preciso levar alguns aspectos em consideração: se o local será construído especialmente para esta finalidade, se há um local existente que será adaptado para laboratório e se haverá exclusividade de uso, ou seja, se será compartilhado por pesquisas de áreas diferenciadas. As especificações para edificações em ambientes de trabalho são dispostas pelas Normas Regulamentadoras do Ministério do Trabalho em Emprego.

Há instruções detalhadas sobre os aspectos de elementos como piso, paredes, teto, portas e janelas. De acordo com a NR-08 (Brasil, 2001), o piso deve ser impermeável, antiderrapante, possuir resistência mecânica e química e não deve apresentar saliência nem depressões que prejudiquem a circulação de pessoas ou a movimentação de materiais. Deve-se também manter uma constante manutenção e limpeza.

Os reparos devem ser feitos o mais breve possível, mantendo-se sempre o bom estado. Recomenda-se, ainda, o uso de cerâmica comum, devido ao baixo custo, facilidade na colocação e limpeza, segurança oferecida, ótima resistência e durabilidade. (Pino; Krüger, 1997, p. 62)

Pino e Krüger (1997), mencionando a norma, ressaltam que janelas e portas devem ser amplas e distribuídas de tal forma que permitam uma boa iluminação e mantenham o laboratório arejado. Considerando a NR-23, que regulamenta sobre proteção contra incêndio, locais de trabalho deverão dispor de saídas, em número suficiente e dispostas de modo que aqueles que se encontrem nesses locais possam abandoná-los com rapidez e segurança, em caso de emergência (Brasil, 2011c).

A largura mínima das aberturas de saída deve ser de 1,20m (um metro e vinte centímetros). O sentido de abertura da porta não pode ser para o interior do local de trabalho. Caso não for possível o acesso imediato às saídas, devem existir, em caráter permanente e completamente desobstruídos, circulações internas ou corredores de acesso contínuos e seguros, com largura mínima de 1,20m (um metro e vinte centímetros). A norma também enuncia que as aberturas, saídas e vias de passagem devem ser claramente assinaladas por meio de placas ou sinais luminosos, indicando a direção da saída (Brasil, 2011c).

4.2. RISCOS

Segundo o Conselho Regional de Química (BORGES, 2009), risco é a possibilidade ou a probabilidade de ocorrer um acidente ou doença profissional. As atividades praticadas nos laboratórios requerem conhecimento específicos da área e noções acerca dos riscos existentes. O entendimento desses riscos, aliado a atitudes cuidadosas, é primordial a fim de evita-los.

Segundo a NR-09 são considerados riscos ambientais aqueles causados por agentes físicos, químicos e biológicos existentes nos ambientes de trabalho que, em função de sua natureza, concentração ou intensidade e tempo de exposição, são capazes de causar danos à saúde do trabalhador (Brasil, 1994).

A NR-09 considera agentes físicos as diversas formas de energia a que possam estar expostos os trabalhadores, tais como: ruído, vibrações, pressões anormais, temperaturas extremas, radiações ionizantes, radiações não ionizantes, bem como o infrassom e o ultrassom. Em relação aos agentes químicos, a norma enumera substâncias, compostos ou produtos que possam penetrar no organismo pela via respiratória, nas formas de poeiras, fumos, névoas, neblinas, gases ou vapores, ou que, pela natureza da atividade de exposição, possam ter contato ou ser absorvidos pelo organismo através da pele ou por ingestão. A norma ainda elenca agentes biológicos as bactérias, fungos, bacilos, parasitas, protozoários, vírus, entre outros, porém estes não serão aqui avaliados, uma vez que os riscos físicos e químicos são mais comuns em ambiente de laboratório.

4.3. SEGURANÇA DO TRABALHO

No Brasil, a segurança e saúde ocupacionais estão regulamentadas e descritas como Serviço Especializado em Engenharia de Segurança e em Medicina do Trabalho (SESMT). A NR-04, (BRASIL, 2009) descreve como devem ser organizados os Serviços Especializados em Engenharia de Segurança e em Medicina do Trabalho, buscando diminuir os acidentes de trabalho e as doenças ocupacionais.

A saúde e a segurança no trabalho englobam, portanto, o bem-estar social, mental e físico dos trabalhadores. O trabalho desempenha um papel importante na vida das pessoas, uma vez que a maioria dos trabalhadores passa pelo menos oito horas diárias no local de trabalho, quer seja numa plantação, num laboratório, numa fábrica, etc. Desta forma, os ambientes laborais devem ser seguros e saudáveis.

Existem anualmente em todo o mundo pelo menos 250 milhões de acidentes de trabalho, dos quais pelo menos 335.000 resultam em morte. Os países emergentes têm mais acidentes mortais do que países mais desenvolvidos, evidenciando a necessidade de programas de formação sobre saúde e de segurança que se concentrem na prevenção dos riscos profissionais. Muitas vezes, é difícil identificar as causas, tanto dos acidentes como das doenças profissionais. O empenho dos órgãos de gestão na saúde e segurança, bem como a forte participação do trabalhador, são dois elementos essenciais de qualquer programa de saúde e segurança no local de trabalho bem-sucedido (GEP, 2009).

Com base nos riscos encontrados, foram avaliadas as conformidades ou ausência delas, de acordo com normas regulamentadoras 4,5,6,7,8,9,11,20,23 e 26, descritas a seguir. Neste estudo, detectou-se, em primeiro lugar, os riscos e a partir destes, avaliou-se as conformidades. As normas foram, então, consultadas a fim de certificar a condição constatada.

- I. A Norma Regulamentadora Nº 04 - Serviços Especializados em Engenharia de Segurança e em Medicina do Trabalho – SESMT
- II. Norma Regulamentadora Nº 05 - Comissão Interna de Prevenção de Acidentes – CIPA
- III. Norma Regulamentadora Nº 06 – Equipamentos de Proteção Individual – EPI
- IV. Norma Regulamentadora Nº 07 – Programa De Controle Médico De Saúde Ocupacional
- V. Norma Regulamentadora Nº 08 – Edificações
- VI. Norma Regulamentadora Nº 09 – Programas de Prevenção de Riscos Ambientais – PPRA
- VII. Norma Regulamentadora Nº 11 -Transporte, Movimentação, Armazenagem e Manuseio de Materiais
- VIII. Norma Regulamentadora Nº 20 – Segurança e Saúde no Trabalho com Inflamáveis e Combustíveis
- IX. Norma Regulamentadora Nº 23 – Proteção Contra Incêndios
- X. Norma Regulamentadora Nº 26 – Sinalização de Segurança
- XI. NBR 16291 – Chuveiros e lava-olhos de emergência (Prado Filho, 2014).

5. METODOLOGIA

O local do estudo é a recém-inaugurada Central de Laboratórios de Pesquisa possui área de 1.125m². Essa Central, bloco de pesquisa, foi construída especialmente para o desenvolvimento de novas pesquisas, abriga 28 laboratórios de diversas áreas do conhecimento. Atualmente alguns laboratórios comportam movelaria de escritório, outros se encontram desocupados e os demais já estão em plena atividade científica. A Figura 1 apresenta a vista externa do bloco onde alunos, professores, funcionários de limpeza e demais usuários do bloco atuam diariamente.

Figura 1 - Vista Externa do Bloco de Pesquisas



Fonte: Autoria própria.

A Figura 2 mostra a área interna do bloco de pesquisa:

Figura 2 - Vista Interna Bloco de Pesquisas



Fonte: Autoria própria.

5.1. MAPA DE RISCOS

De acordo com o Manual de elaboração de mapas de risco da Secretaria De Estado de gestão e planejamento do estado de Goiás o mapa de risco é a representação gráfica do reconhecimento dos riscos existentes nos locais de trabalho, por meio de círculos de diferentes tamanhos; e cores. O seu objetivo é informar e conscientizar os trabalhadores pela fácil visualização desses riscos. É um instrumento que pode ajudar a diminuir a ocorrência de acidentes do trabalho; objetivo que interessa aos governantes e servidores (Goiais, 2012).

Dentre as funções do Mapa de Riscos estão: reunir informações suficientes para o estabelecimento de um diagnóstico da situação de segurança e saúde no trabalho do estabelecimento; possibilitar a troca e divulgação de informações entre os servidores, bem como estimular sua participação nas atividades de prevenção. No presente estudo, a elaboração do mapa de riscos baseou-se nos seguintes dados:

- Estudo dos processos de trabalho no local analisado;
- Identificação dos riscos existentes no local analisado;
- Identificação das medidas preventivas existentes e sua eficácia.

5.2. SINALIZAÇÃO

Com base na NR-26 - Sinalização de Segurança (Brasil, 2011d), foi realizado um checklist para verificar as sinalizações presentes no bloco de pesquisa e no laboratório a rotulagem dos produtos químicos segundo os critérios estabelecidos pelo Sistema Globalmente Harmonizado de Classificação e Rotulagem de Produtos Químicos (GHS).

5.3. QUESTIONÁRIO

Foi aplicado um questionário a fim de avaliar a percepção de segurança e riscos pelos usuários do bloco assim como avaliar se estes sabem como proceder em um acidente. Este foi aplicado através da ferramenta eletrônica Google Formulários, para alcançar o maior número de dados e evitar constrangimentos. O questionário foi elaborado com base nos artigos elencados nas normas regulamentadoras.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base nos dados encontrados, via emprego das metodologias elencadas obteve-se os seguintes resultados. A Figura 3 mostra o mapa de riscos para o Bloco L, já a Figura 4 apresenta o mapa de riscos considerando apenas o laboratório de pesquisas e a Figura 5 mostra o mapa de riscos para o Bloco de pesquisa. Para a elaboração dos mapas adotou-se:

Figura 3 - Cores para os Riscos

SIMBOLOGIA PARA OS MAPAS DE RISCOS BLOCO CENTRAL DE PESQUISAS E LABORATÓRIO DO PPGCEM UTFPR LONDRINA		Risco Químico Leve		Risco Mecânico Leve
		Risco Químico Médio		Risco Mecânico Médio
		Risco Químico Elevado		Risco Mecânico Elevado
		Risco Biológico Leve		Risco Físico Leve
		Risco Biológico Médio		Risco Físico Médio
		Risco Biológico Elevado		Risco Físico Elevado

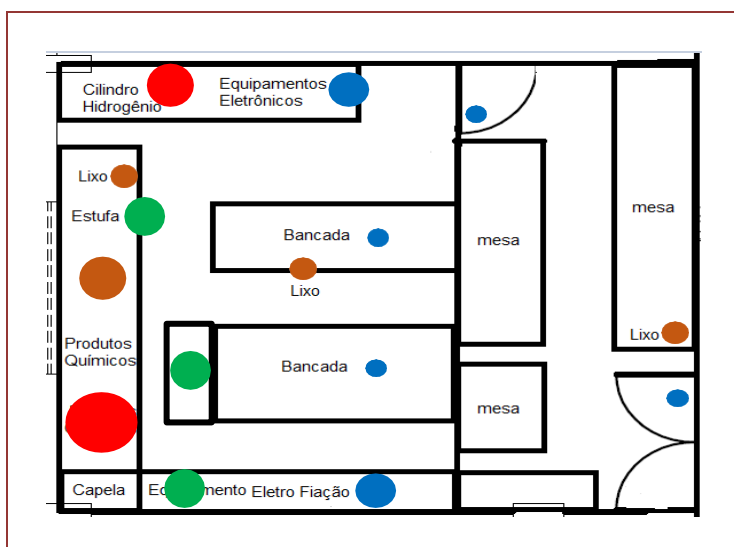
Fonte: Adaptado de (Goiais, 2012).

A Tabela 02 elenca os riscos presentes em ambas as áreas analisadas.

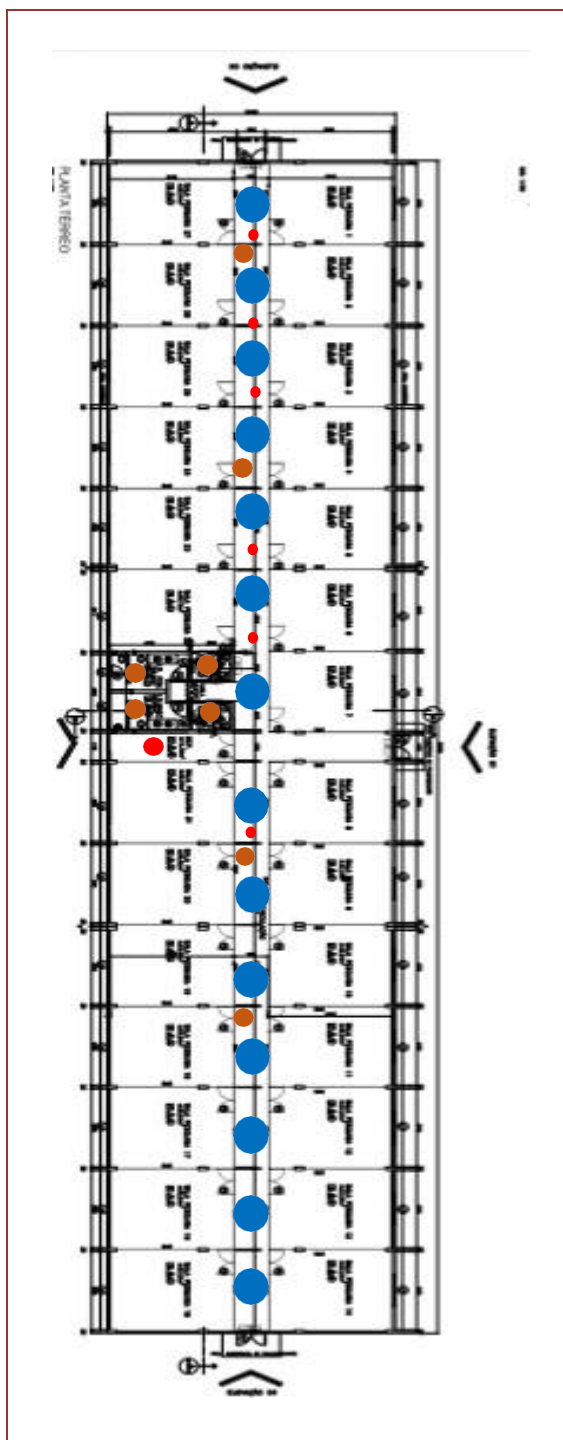
Tabela 2 - Agentes Riscos

Tipo de Risco	Químico	Físico	Mecânico	Biológico
Agentes	Reações Químicas	Ruído e ou som muito alto	Máquinas e equipamento sem Proteção e ou manutenção	Lixo
	Gases Asfixiantes	Frio e ou calor e radiação		Objetos contaminados
	Manipulação de Produtos Químicos		Cargas e transportes em geral	

Figura 4 - Mapa de Riscos do Laboratório de pesquisa



Fonte: Autoria própria.

Figura 5 - Mapa de Riscos do Bloco de Central de Pesquisas

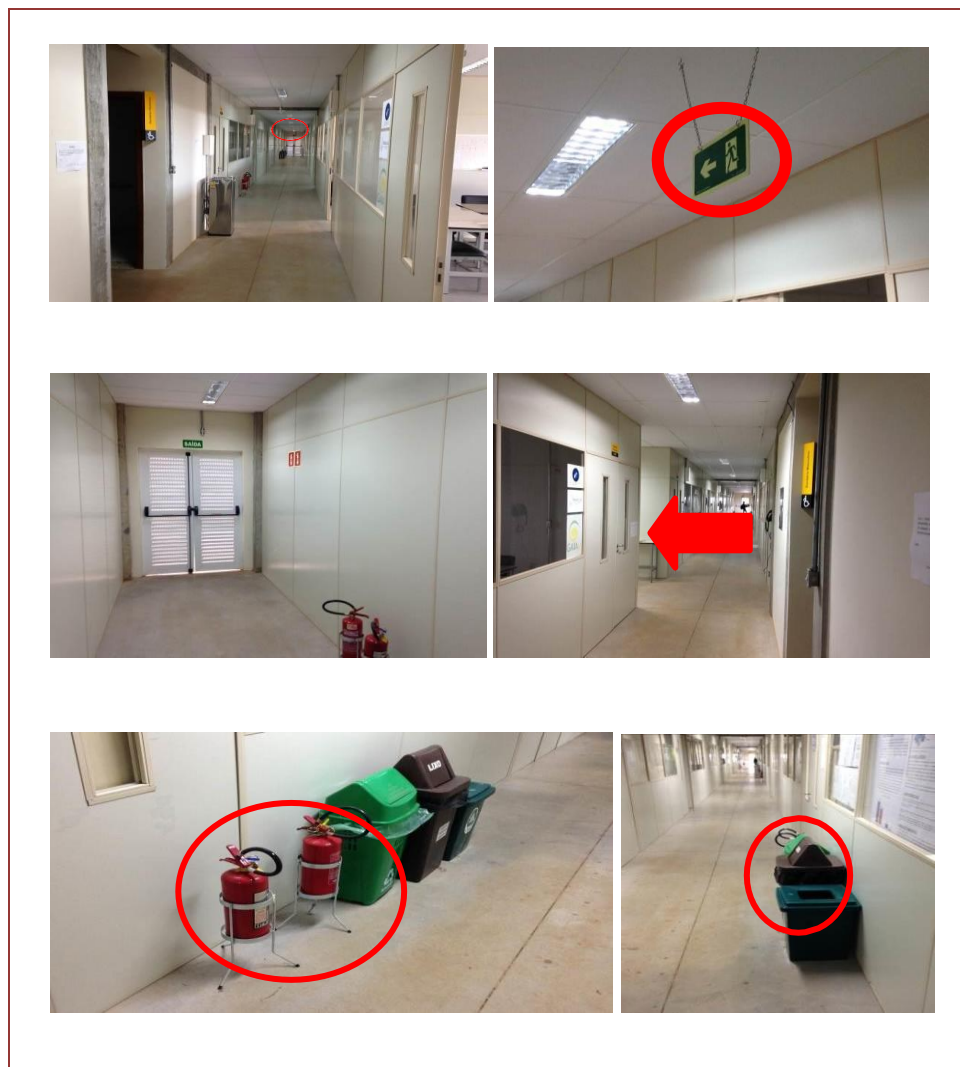
Fonte: Autoria própria.

Com base nas imagens e com a verificação do checklist foi possível verificar inconformidades com o que é descrito na norma. A NR-23 (Brasil, 2011c) enuncia que “as aberturas, saídas e vias de passagem devem ser claramente assinaladas por meio de placas ou sinais luminosos, indicando a direção da saída”.

Apenas alguns laboratórios tem uma visão clara da sinalização de emergências bem como os equipamentos de proteção coletiva. Além disso a sinalização só pode ser claramente visualizada quando o usuário está dentro de seu laboratório, caso este esteja no corredor

não é possível visualizar a placa. Como pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 – Referente a sinalização e os extintores



Fonte: Autoria própria.

Na parte intermediária do bloco existe uma saída de emergência conforme a Figura 7, mas novamente não há nenhuma sinalização que indique essa saída. Em casos de emergência que impliquem na evacuação do bloco a falta de sinalização pode causar confusão.

Ainda de acordo com a NR-23, “nenhuma porta de entrada, ou saída, ou de emergência de um estabelecimento ou local de trabalho, deverá ser fechada a chave, aferrolhada, ou presa durante as horas de trabalho” (Brasil, 2011c). Entretanto, no dia da avaliação realizada para o presente estudo, uma das portas da saída se encontrava aferrolhada.

Quanto aos extintores, a NR-23 determina que:

Os extintores deverão ser colocados em locais: a) de fácil visualização b) de fácil acesso c) onde haja menos probabilidade de o fogo bloquear o seu acesso. Os locais destinados aos extintores devem ser assinalados por um círculo vermelho ou por uma seta larga, vermelha, com bordas amarelas. Deverá ser pintada de vermelho uma larga área do piso embaixo do

extintor, a qual não poderá ser obstruída por forma nenhuma. Essa área deverá ser no mínimo de 1,00m x 1,00m (um metro x um metro) (Brasil, 2011c).

A NR-23 (Brasil, 2011c) se refere à proteção contra incêndios e esta foi aplicada em alguns aspectos na edificação do bloco. Pode-se verificar que as portas e os corredores para acesso às saídas têm largura superior 1,20m, como pede a norma. Já as portas de entrada/saída do bloco de pesquisa têm sua abertura para fora (conforme indica a norma), porém as portas dos laboratórios de pesquisa têm sua abertura para dentro o que não condiz com a norma, conforme observado na Figura 8a e 8b.

Todas as portas, tanto as de saída como as de comunicações internas, devem: a) abrir no sentido da saída; b) situar-se de tal modo que, ao se abrirem, não impeçam as vias de passagem (Brasil, 2011c).

Figura 8 - Sentido de Abertura das Portas: a) Portas entradas/saídas do bloco; b) Portas entradas/saídas dos laboratórios de pesquisa



Fonte: Autoria própria.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná acatou todas as sugestões apresentadas neste trabalho, seguindo todas as normas de segurança, construindo assim um ambiente de trabalho seguro saudável e produtivo reduz a chance de incidentes e promove prevenção e segurança coletiva de todos os envolvidos.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Laboratórios são ambientes insalubres e perigosos, onde a atenção durante a realização de experimentos é essencial para evitar acidentes de trabalho.

Riscos físicos e químicos são os mais comuns nesses ambientes de pesquisa, devido ao

uso de equipamentos, reagentes e atividades executadas. Muitos usuários não podem concluir seus experimentos apenas com os equipamentos disponíveis em seu laboratório, isso resulta no transporte indevido de reagentes químicos de um laboratório para outro, aumentando assim o risco de acidente. Por meio do questionário, mapa de riscos e checklist a luz das normas regulamentadoras foi possível determinar, além dos riscos presentes, se os usuários do bloco tinham instrução suficiente para evitá-los.

Foi constatado no presente estudo que a metade dos usuários do bloco não sabem como se comportar em uma situação de risco e que não receberam treinamentos ou informativos do uso dos equipamentos e reagentes presentes em seus próprios laboratórios. Apesar dos laboratórios apresentarem sinalização de evacuação em caso de acidentes, muitas vezes essas não estão visíveis o suficiente.

Equilibrar a finalidade do mapa de risco com as demais normas regulamentadoras e implementação do sistema de classificação (GHS) auxiliaria na obtenção de tais informações para a prevenção e segurança coletiva dos usuários. Esse sistema de classificação informa e instrui os usuários a como proceder não somente em situações de risco mais também na realização dos próprios procedimentos.

Em laboratórios seguros, usuários utilizam equipamentos e realizam as suas práticas experimentais de forma mais produtiva. Isso seria mais acessível por meio de informações obtidas em mapa de riscos e manual de boas práticas. Usufruir de um ambiente de trabalho seguro saudável e produtivo reduz a chance de incidentes e promove prevenção e segurança coletiva.

REFERÊNCIAS

- [1] ABQUIM, Associação Brasileira Da Indústria Química. **Departamento de Assuntos Técnicos. O que é o GHS? Sistema harmonizado globalmente para a classificação e rotulagem de produtos químicos.** São Paulo: ABIQUIM/DETEC, 2005.
- [2] BORGES, Adolfo Godoy. **Segurança em laboratório químico.** 2009. Disponível em: <http://www.crq4.org.br/sms/files/file/mini_seg_lab_2009.pdf>. Acesso em: 05 jun. 2017.
- [3] BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Assistência à Saúde. **Série Saúde & Tecnologia — Textos de Apoio à Programação Física dos Estabelecimentos Assistenciais de Saúde — Condições de Segurança Contra Incêndio.** Brasília: Ministério da Saúde, 1995.
- [4] BRASIL, Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora 4 – Serviços Especializados em Engenharia de Segurança e em Medicina do Trabalho.** Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2009.
- [5] BRASIL, Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora 5 – Comissão Interna de Prevenção de Acidentes.** Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2011a.
- [6] BRASIL, Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora 6 – Equipamento de Proteção Individual.** Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2011b.
- [7] BRASIL, Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora 7 – Programa De Controle Médico De Saúde Ocupacional.** Brasília: Ministério do Trabalho, 1977.
- [8] BRASIL, Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora 8 – Edificações.** Brasília: Ministério do Trabalho, 2001.
- [9] BRASIL, Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora 9 – Programa de Prevenção de Riscos Ambientais;** Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 1994.
- [10] BRASIL, Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora 11 – Transporte, Movimentação, Armazenagem e Manuseio de Materiais.** Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2004;

- [11] BRASIL, Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora 20** – Segurança E Saúde No Trabalho Com Inflamáveis e Combustíveis. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2012
- [12] BRASIL, Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora 23** – Proteção Contra Incêndios. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2011c.
- [13] BRASIL, Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora 26** – Sinalização de Segurança. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2011d.
- [14] GEP - Gabinete de Estratégia e Planejamento. **Introdução à Saúde e Segurança no Trabalho**. Bureau Internacional do Trabalho: Genebra, 2009.
- [15] GOIAIS, **Manual De Elaboração Mapa De Riscos**. 2012. Disponível em: <<http://www.sgc.goias.gov.br/upload/arquivos/2012-11/manual-de-elaboracao-de- mapa-risco.pdf>>. Acesso em: 11 ago. 2017.
- [16] MICHAELIS. **Laboratório**. São Paulo: Melhoramentos, 2017. Disponível em: <<http://michaelis.uol.com.br/busca?r=0&f=0&t=0&palavra=laboratório>>. Acesso em: 01 jun. 2017.
- [17] OMS - Organização Mundial da Saúde. **Ambientes de trabalho saudáveis: um modelo para ação: para empregadores, trabalhadores, formuladores de política e profissionais**. Tradução do Serviço Social da Indústria. – Brasília: SESI/DN, 2010.
- [18] PINO, JOSE C.; KRÜGER, Verno. **Segurança no laboratório**. Porto Alegre: CECIRS. 1997
- [19] PRADO FILHO, Hayrton Rodrigues do. **Chuveiro e lava-olhos de emergência: equipamentos imprescindíveis para o manuseio de produtos químicos**. 2014. Disponível em: <<https://qualidadeonline.wordpress.com/2014/07/13/chuveiro-e-lava- olhos-de-emergencia-equipamentos-imprescindiveis-para-o-manuseio-de-produtos- quimicos/>>. Acesso em: 10 jun. 2017.

Capítulo 16

Estudo estatístico da qualidade da água em dez pontos de um rio utilizando Análise de Componentes Principais

Renato Dultra Pisaneski

Alessandra Cristina de Oliveira

Julia Coutinho de Oliveira

Hugo Pimentel Tavares

Nilo Antonio de Souza Sampaio

Resumo: Este estudo teve como objetivo demonstrar uma aplicação da "Estatística Multivariada", especificamente apresentando uma aplicação da Análise de Componentes Principais (ACP). Para atingir esse objetivo, este teste foi aplicado a dados de um rio na região sul do estado do Rio de Janeiro. Vale ressaltar que os dados são inteiramente empíricos, obtidos por amostragem no local.

Palavras-chave: *Software* Estatístico, ACP (Análise de Componentes Principais), Estatística Multivariada.

1. INTRODUÇÃO

A Estatística tem papel fundamental na análise e interpretação de dados ambientais, sendo uma ferramenta essencial para a compreensão de fenômenos ecológicos, monitoramento de recursos naturais, avaliação de impactos ambientais e definição de políticas públicas sustentáveis. Por meio de métodos estatísticos, é possível coletar, organizar e interpretar grandes volumes de dados provenientes de diferentes fontes, como sensores remotos, estações meteorológicas e estudos de campo. Na área ambiental, a Estatística é amplamente utilizada no monitoramento da qualidade do ar e da água, análise de séries temporais climáticas, modelagem da dispersão de poluentes, estudos de biodiversidade, entre outras aplicações. A análise estatística permite, por exemplo, identificar tendências de aquecimento global, prever eventos extremos como enchentes e secas, e avaliar os efeitos de atividades humanas sobre o meio ambiente (Machado, G. A.; Lima, 2011).

Além disso, técnicas como a análise multivariada, regressão e geoestatística são frequentemente empregadas para estudar relações entre variáveis ambientais e elaborar modelos preditivos. Essas ferramentas auxiliam na tomada de decisões fundamentadas em evidências, promovendo uma gestão ambiental mais eficiente e sustentável (Pereira, 2014).

A Análise de Componentes Principais (PCA) é um método estatístico que reduz as dimensões de um conjunto de dados de alta dimensão, criando um novo conjunto de variáveis menos numerosas e não correlacionadas, denominadas componentes principais. Essas componentes são combinações lineares das variáveis originais e capturam a maior parte da variância nos dados, permitindo efetivamente uma visualização, exploração e pré-processamento mais fáceis de conjuntos de dados complexos, mantendo as informações essenciais. A PCA10 ocupa um papel importante neste tipo de tratamento de dados sendo a ferramenta mais comumente empregada na química (da Silva Ferreira et al., 2023).

O objetivo deste artigo é mostrar a aplicação da Análise de Componentes Principais para dez amostras independentes em uma aplicação ambiental. Inicialmente, o artigo abordará os conceitos de Estatística Multivariada mais especificamente Análise de Componentes Principais. Em seguida, serão apresentados os resultados e as discussões dos objetivos propostos, e será apresentada uma aplicação ambiental. Por fim, será apresentada as Conclusões.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A estatística multivariada é um conjunto de métodos e técnicas estatísticas que permite a análise simultânea de múltiplas variáveis de um conjunto de dados, oferecendo uma visão mais completa e integrada dos fenômenos estudados, especialmente quando essas variáveis estão interligadas. Seu objetivo é identificar padrões, correlações e relações complexas entre as diversas variáveis, resultando em inferências mais confiáveis e descrições mais precisas da realidade (JF et al., 2009).

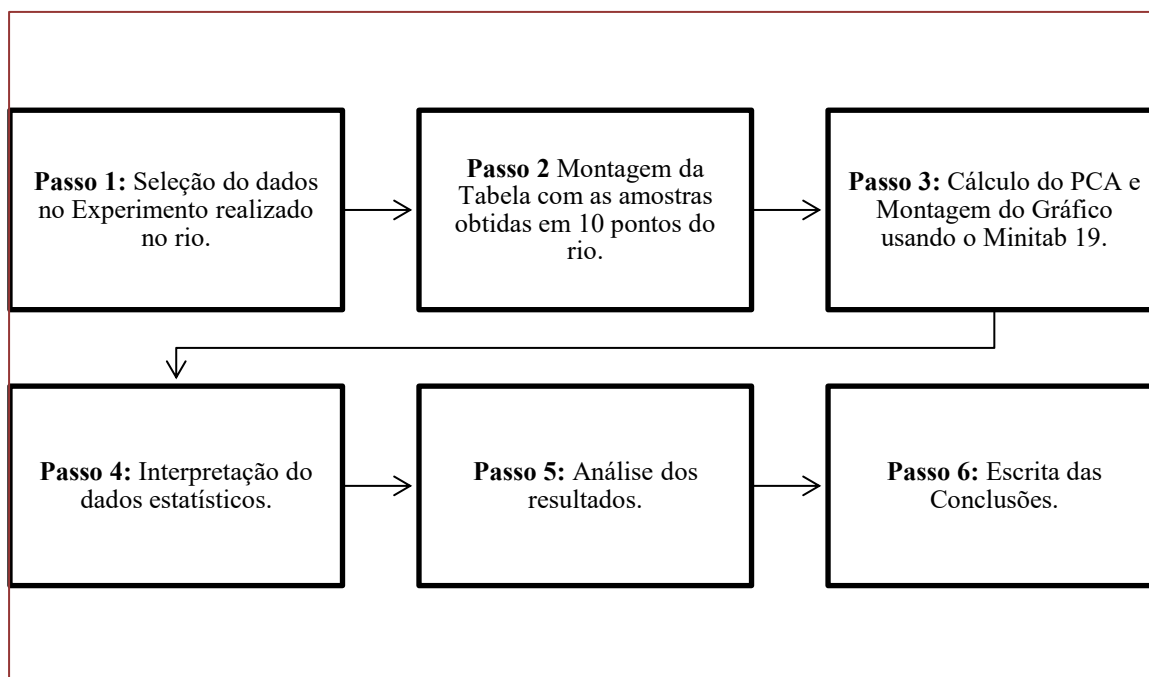
A análise de componentes principais (acp ou pca) é uma técnica estatística de redução de dimensionalidade que transforma variáveis correlacionadas em um conjunto de novas variáveis não correlacionadas, chamadas componentes principais, mantendo a maior parte da variabilidade original dos dados. O objetivo é simplificar dados de alta dimensão, identificar padrões, visualizar tendências e melhorar o desempenho de algoritmos de aprendizado de máquina, convertendo um conjunto de variáveis originais em um número menor de componentes que explicam a maior parte da variação (Abdi & Williams, 2010).

A pca busca capturar a variação mais significativa dos dados e representá-la em novas variáveis chamadas componentes principais. As componentes principais são linearmente não correlacionadas entre si, o que facilita a análise e melhora o desempenho de modelos estatísticos, especialmente em casos de multicolinearidade, ela pode criar representações bidimensionais ou tridimensionais de dados de alta dimensão, facilitando a visualização e a identificação de estruturas (Silva et al., 2023).

3. MÉTODO DE PESQUISA

Este artigo pode ser classificado como uma pesquisa aplicada, pois visa a fornecer melhorias na literatura atual, com objetivos empíricos normativos, visando ao desenvolvimento de políticas e estratégias que melhorarão a condição atual. (Rezende et al., 2023; Sampaio et al., 2022). A abordagem do problema é quantitativa, como o método de pesquisa de modelagem e simulação. As etapas da pesquisa foram realizadas de acordo com a sequência mostrada na Figura 1.

- Etapa 1: Os dados experimentais foram selecionados de um experimento realizado no Rio Paraíba do Sul em dois pontos específicos.
- Etapa 2: Montagem da Tabela com as amostras obtidas em 10 pontos do rio.
- Etapa 3: Cálculo do PCA e Montagem do Gráfico usando o Software Minitab 19.
- Etapa 4: foi realizada a interpretação dos resultados.
- Etapa 5: a situação do problema foi analisada e as possíveis tomadas de decisão foram baseadas nos resultados obtidos.
- Etapa 6: As conclusões apresentadas no final deste artigo foram tiradas com base nos resultados obtidos nas etapas anteriores.

Figura 1. Passos do método de pesquisa

Fonte: Autores (2025).

3.1. ESTUDO DE CASO

As diferenças entre a pH, Temperatura (°C), Oxigênio Dissolvido (mg/L), Turbidez (NTU) e Concentração de Nitrato (mg/L) em 10 pontos do rio, o objetivo é reduzir a dimensionalidade dos dados, identificar padrões e qual variável contribui mais para a variabilidade geral.

Tabela 1. Amostras de água nos 10 pontos estudados

Amostra	pH	Temp	O ₂ Dissolvido	Turbidez	Nitrato
1	7.2	15.1	8.3	4.2	1.5
2	7.5	15.4	8.1	3.8	1.7
3	7.1	14.8	8.5	4.5	1.4
4	7.3	15.0	8.2	4.0	1.6
5	6.9	14.5	8.7	4.8	1.2
6	7.6	15.6	8.0	3.6	1.8
7	7.2	15.2	8.4	4.1	1.5
8	7.4	15.3	8.2	3.9	1.6
9	7.0	14.9	8.6	4.6	1.3
10	7.8	15.7	7.9	3.5	1.9

Fonte: Autores (2025).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. ESTUDO DE CASO

Realizou-se a Análise de Componentes principais (PCA) para analisar os dados. Observando a Tabela-2 pode-se Interpretar que PC1 e PC2 juntos explicam ~86 % da variância dos dados.

Tabela 2. Autovalores, Proporção e Variância Acumulada

Componente	Autovalor	Proporção Variância	Variância Acumulada
PC1	2.8	56%	56%
PC2	1.5	30%	86%
PC3	0.5	10%	96%
PC4	0.15	3%	99%
PC5	0.05	1%	100%

Fonte: Autores (2025).

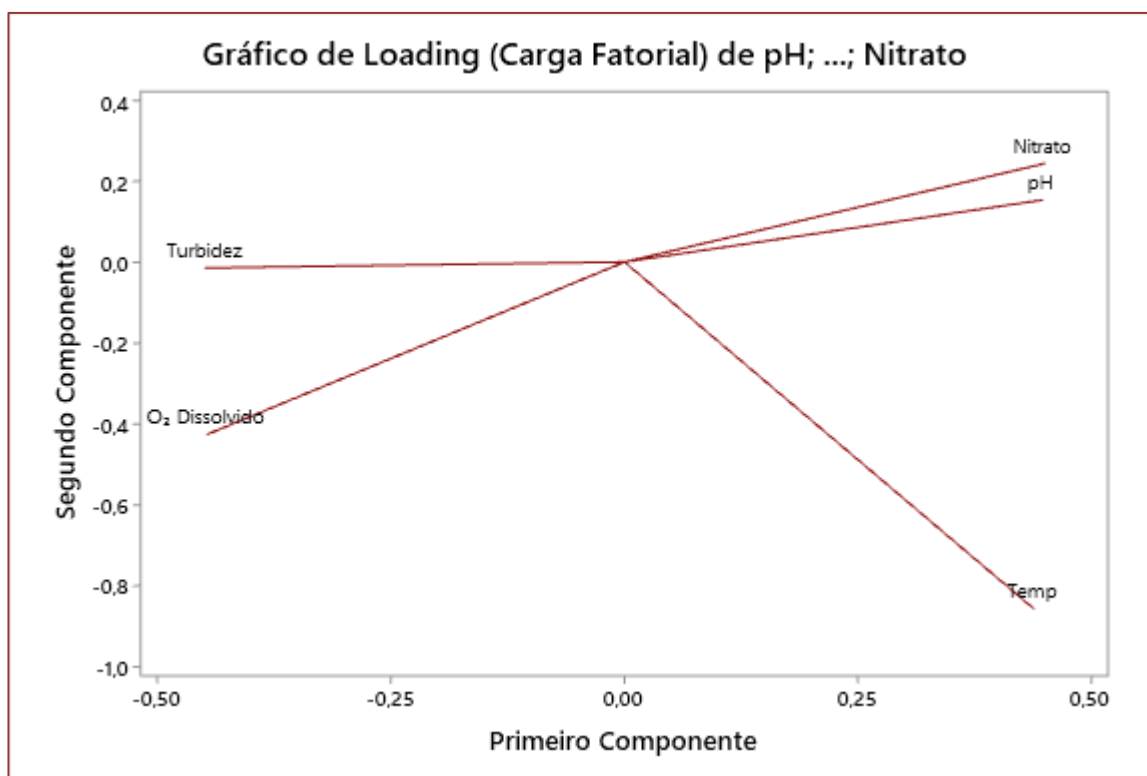
Observando-se a Tabela-3 pode-se concluir que:

- PC1 (56 % da variância): forte contribuição de Temperatura, Oxigênio e Nitrato → indica um gradiente de qualidade química / temperatura.
- PC2 (30 % da variância): forte contribuição de Turbidez e pH → reflete condições físico-químicas (turbidez + pH).
- Cargas elevadas (em valor absoluto) destacam as variáveis mais influentes no componente.

Tabela 3. Vetores (Cargas) das Variáveis nos Componentes

Variável	PC1	PC2
Temperatura	+0.50	-0.20
Terraza Dissolvido	+0.52	+0.10
Nitrato	+0.47	-0.30
Turbidez	-0.10	+0.65
pH	-0.15	+0.60

Fonte: Autores (2025).

Figura 1. Gráfico de cargas ("loading plot") para as variáveis

Fonte: Autores (2025).

Na Figura-1 o Nitrato e o pH estão positivamente correlacionados pois os dois vetores estão relativamente próximos. A Turbidez por sua vez não está correlacionada com o pH, o O_2 dissolvido está inversamente relacionado com o Nitrato, pois o aumento do nitrato em si não diminui diretamente o oxigênio dissolvido, mas o nitrato é um sinal de poluição orgânica, que consome o oxigênio. O oxigênio dissolvido não se correlaciona diretamente com a Temperatura pois os vetores formam entre si um ângulo de quase 90° .

5. CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo mostrar a importância da Análise de Componentes Principais em tratamento de dados ambientais. Os resultados comprovaram que se reduziu de 5 variáveis ambientais para 2 componentes principais, mantendo boa parte da informação (86 % da variabilidade); PC1 representa um gradiente químico/termal; PC2 representa um perfil físico-químico; Isso facilita análises subsequentes — como regressões ou mapas de contaminação por local/amostra.

REFERENCIAS

- [1] Abdi, H., & Williams, L. J. (2010). Principal component analysis. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2(4), 433–459. <https://doi.org/10.1002/wics.101>
- [2] da Silva Ferreira, D., da Silva Rodrigues, L., Pereira, F. M. V., & Pereira-Filho, E. R. (2023). Principal Component Analysis (Pca) for Chemical Data Evaluation and Heat Maps Preparation: a Tutorial. *Quimica Nova*, 46(7), 747–754. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20230030>

- [3] JF, H., Black, W., Babin, B., Anderson, R., & RL Tatham. (2009). *Análise multivariada de dados*. books.google.com.
- [4] Machado, G. A.; Lima, M. I. S. (2011). *Estatística aplicada às ciências ambientais*. Blucher.
- [5] Pereira, P. A. A. (2014). *Estatística e meio ambiente: aplicações e estudos de caso*. EMBRAPA.
- [6] Rezende, M. D., Rosa, C. S. da, Cardoso, R. P., Reis, J. S. da M., & Sampaio, N. A. de S. (2023). Statistics as a Tool for Decision Making in Agricultural and Environmental Experiments. *Revista de Gestão e Secretariado*, 14(4), 5204–5217. <https://doi.org/10.7769/gesec.v14i4.1978>
- [7] Sampaio, N. A. de S., Reis, J. S. da M., Espuny, M., Cardoso, R. P., Gomes, F. M., Pereira, F. M., Ferreira, L. C., Barbosa, M., Santos, G., & Silva, M. B. (2022). Contributions to the future of metaheuristics in the contours of scientific development. *Gestão & Produção*, 29(1), 1–19. <https://doi.org/10.1590/1806-9649-2022v29e099>
- [8] Silva, G. R., Dimensionalidade, R. De, & Alvos, D. M. (2023). *Redução de Dimensionalidade em Problemas de Múltiplos Alvos : uma Comparação entre PCA e*.

Capítulo 17

Desenvolvimento e caracterização de um biobatom

Rosângela Maia dos Santos

Annuska Vieira Cabral

Jucenir dos Santos Ferreira

Gabriel Francisco da Silva

Tatiana Pacheco Nunes

Alessandra Almeida Castro Pagani

Resumo: O desenvolvimento de produtos naturais tem sido a busca de muitos setores industriais. Assim, este trabalho teve como objetivo desenvolver um biobatom utilizando compostos bioativos com própolis e hibisco. Foram realizadas duas formulações (A e B) e comparadas com o comercial C. Os batons foram armazenados à temperatura ambiente por 75 dias foram realizadas análises físico-químicas, propriedades físico-mecânicas e ópticas. O batom A apresentou pH de $5,52 \pm 0,06$, o batom B de $5,84 \pm 0,05$ e o batom C (comercial) apresentou pH de $5,71 \pm 0,08$ estatisticamente diferentes entre si, porém compatíveis com o pH dos lábios. O resíduo de minerais foi de $0,68 \pm 0,05\%$ para o batom A, e $0,40 \pm 0,01\%$ para o batom B e o batom comercial de $1,39 \pm 0,05\%$. O batom C apresentou o a maior dureza $324 \pm 0,57$ g. Em relação a elasticidade, o batom B apresentou o maior valor $4,92 \pm 0,02$ mm. Não houve diferença significativa quanto ao quesito resiliência entre as três amostras. Desta forma foi possível desenvolver o biobatom com potencial inovador.

Palavras-Chave: Biobatom, Própolis, Corante natural.

1. INTRODUÇÃO

O batom é um produto cosmético que remonta ao período pré-histórico da ornamentação feminina. Sua principal característica é manter a pele bonita e sadia, além de cobrir imperfeições e redefinir os lábios. O termo "batom" (do francês bâton) é um "bastão" constituído basicamente por uma dispersão de corantes e pigmentos, ceras, óleos e silicatos. Aditivos são adicionados para melhorar o sabor e proteger o produto contra a contaminação microbiológica, oxidação e alterações induzidas pela radiação UV (SCHLOSSMAN, 2009; SOARES, 2012, GERSON, 2012, RIBEIRO, 2010; GOMES et al., 2009).

A maioria da coloração de batom é consequência do uso de corantes e de pigmentos inorgânicos, com destaque para os óxidos de metais, como óxido de ferro, óxido de titânio, pó de cobre, óxido ou hidrato de cromo. Estes pigmentos podem arrastar como impurezas elementos tóxicos como: Arsênio (As), Níquel (Ni), Chumbo (Pb), entre outros. Estes elementos tóxicos e seus compostos quando solúveis em água podem ser parcialmente absorvidos pela pele, principalmente se o cosmético for formulado sob forma pastosa ou líquida (SAINIO, 2000). Utilizados ao longo dos anos por mulheres e crianças, podem promover efeitos indesejáveis aos lábios, como irritabilidade e hipersensibilidade, além de consequências crônicas ao corpo humano. As indústrias de cosméticos estão, cada vez mais, adeptas a produção de produtos naturais (FARIA et al., 2012). A tendência desse mercado é a expansão dos produtos desenvolvidos a partir de extratos naturais, que os mesmos estão relacionados à qualidade de vida em geral, à beleza, ao bem-estar e ao prazer aliados à saúde, a estética a juventude e a aparência saudável (CHIARI et al., 2012). A utilização de própolis, hibisco, óleo de coco, cera de abelha e manteiga de cacau são os componentes essenciais para a elaboração do biobatom. São consideradas fontes potenciais de antioxidantes naturais. O hibisco pode ser considerado uma matriz vegetal com ampla variedade de compostos bioativos, como carotenóides e compostos fenólicos, podendo ser utilizado como corante natural. A adição de própolis tem efeito benéfico nas propriedades do batom como antioxidantes e vitamina C. Este trabalho teve como objetivo desenvolver batom natural (biobatom) rico em compostos bioativos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo a Resolução N° 79, de 28 de agosto de 2000 da Agencia Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), produtos de Higiene Pessoal, Cosméticos e Perfumes são preparações constituídas por substâncias naturais ou sintéticas, de uso externo nas diversas partes do corpo humano, pele, sistema capilar, unhas, lábios, órgãos genitais externos, dentes e membranas mucosas da cavidade oral, com o objetivo exclusivo ou principal de limpá-los, perfumá-los, alterar sua aparência e ou corrigir odores corporais e ou protegê-los ou mantê-los em bom estado (BRASIL, 2000).

O crescimento da indústria da beleza está sendo impulsionado pelo desenvolvimento de pesquisa em ciência e tecnologia usando inovações mais amplas para criar e desenvolver novos produtos de beleza. Os cosméticos apresentam um papel importante nesta indústria por meio da utilização de produtos que proporcione melhoraria na aparência do corpo humano, sendo o batom um desses produtos (KORICHI & THANCHANT, 2009). O uso de batom e a escolha de tons de cores e texturas foi modificada, tornando-se mais ampla (CHATTOPADHYAY, 2005).

Os componentes usados nas formulações de cosméticos para área dos lábios e olhos devem cumprir as especificações de identidade e pureza estabelecidas pelos organismos internacionais de referência, e considera que para os corantes orgânicos artificiais as impurezas máximas permitidas são: arsênico (expresso em As₂O₃) de 3 mg kg⁻¹, chumbo (expresso em Pb) de 20 mg kg⁻¹ e outros metais traços de 100 mg kg⁻¹ (BRASIL, 2000).

Dentre os vários metais traços, destaca-se o chumbo, o qual possui um efeito tóxico ao ser humano causando efeitos crônicos, neurológicos, hematológicos e renais (AL-SALEH, 2009).

O batom é responsável pela alteração no aspecto natural dos lábios conferindo um visual diferente, animado, com cor e brilho diferentes. Apresenta como elemento marcante a cor. Ele também proporciona aos lábios melhoria da aparência e proteção às condições externas. O desenvolvimento tecnológico permite a produção de novos tipos de batons com propriedades protetora, hidratante, água e a prova de toque, ervas, totalmente transparentes, etc. (CLERMONT-GALLERANDE et al, 1999, MITSUI, 1997).

Os primeiros relatos de uso de material para realizar pinturas na pele foi há 30 mil anos, através de matérias primas provenientes da natureza, do ocre (cor, variação do marrom) ou de alguma mina de calcário. A natureza sempre foi pródiga fornecedora de matéria prima para a cosmética. Açafrão, hena, terra vermelha, Kohl (carvão), fuligem, 17 índigo, frutas silvestres roxas e vermelhas e outros produtos estão presentes na maquiagem das mulheres na antiguidade (LOPS, 2009).

Os materiais utilizados para elaboração de batom são em sua grande maioria: óleo de ricínio, de oliva, de mineral, de gergelim, de manteiga de cacau, de petróleo, de lecitina e de vegetais hidrogenados. As ceras mais comuns são a parafina, a cera de abelha, a carnaúba e a candelila. E um dos corantes bastante utilizados é o ácido brômico, além do óxido de ferro. A mica e o urucum são os corantes (GERSON, 2012).

A própolis é formada por material resinoso e balsâmico, coletados e processados pelas abelhas, de estrutura complexa, a partir de várias fontes vegetais como, por exemplo, flores, pólen, brotos e exsudados de árvores. Além desses, na colmeia, as abelhas adicionam secreções salivares. Esse produto final é utilizado pelas abelhas para eliminar possíveis invasores, selar aberturas na colmeia e embalsamar predadores que morrem dentro delas impedindo a proliferação de microrganismos (PEREIRA et al., 2002, BONHEVI et. al., 1994, BANKOVA, 2005).

O *Hibiscus* sp é um gênero de plantas com flor que agrupa cerca de 300 espécies, com flores e folhas exuberantes. As flores apresentam beleza, perfume, cor e sabor e 23 geralmente são ricas em compostos bioativos como os antioxidantes ((LORENZI et al., 2008; FELIPPE; TOMASI, 2004).

O pó do hibisco possui propriedades antioxidantes e antimicrobianas, é utilizado como corante natural, sendo empregado para fins medicinais e alimentares. As flores são fonte de antocianinas, visualizadas no espectro colorido de rosa a púrpura (MACIEL et al., 2012). possui propriedades antioxidantes e antimicrobianas, é utilizado como corante natural, sendo empregado para fins medicinais e alimentares. As flores são fonte de antocianinas, visualizadas no espectro colorido de rosa a púrpura (MACIEL et al., 2012).

O coqueiro (*Cocos nucifera* L.) pertencente à família Palmae, originário do Sudeste asiático, foi introduzido no Brasil no ano de 1553 onde se apresenta naturalizado 24 em longas áreas da costa nordestina. Proporcionando abundante matéria-prima tanto para as agroindústrias regionais quanto para uso alimentício, é uma planta com expectativa de vida de aproximadamente 100 anos. Possui uma infinidade de usos que vão desde a madeira do tronco, do fruto (coco) que se consome, a semente representada pelo albúmen sólido, ou copra, conhecido como “carne” do coco, e o albúmen líquido que é a água de coco. O coqueiro possui indicação etnobotânica de adstringente, diurético, no tratamento de infecções da pele, trato urinário e disenterias (SIVAKUMAR et al., 2011).

A manteiga de cacau é um a gordura comestível natural extraída da semente de cacau, contem antioxidantes naturais, tais como polifenóis que evitam na prevenção do envelhecimento celular e na eliminação de radicais livres, e evitam, também, que ela se torne rançosa permitindo seu armazenamento em um prazo de 2 a 5 anos. É um componente de grande importância na formação do batom, em função de sua composição química e característica física pastosa, é constituída por uma combinação de ácido palmítico, ácido esteárico e ácido oléico (INOVAM, 2010).

A cera de abelha é utilizada pelo homem há séculos na medicina. O uso em cosmetologia, devido à presença de retinol, é muito amplo, pois possui ação regenerativa. É muito comum em formulações de batom. A cera de abelha é produzida por 26 quatro pares de glândulas cancerígenas, localizadas no abdômen das abelhas carpinteiras. Essas glândulas têm maior função na faixa entre o décimo quarto e décimo oitavo dia de vida, as carpinteiras secretam a cera em forma líquida, que, em contato com o ar, se solidifica em pequenas escamas transparentes. Então, as abelhas trabalham esta cera com as mandíbulas sob a forma de alvéolos hexagonais construindo assim, os favos (FREITAS, 2010).

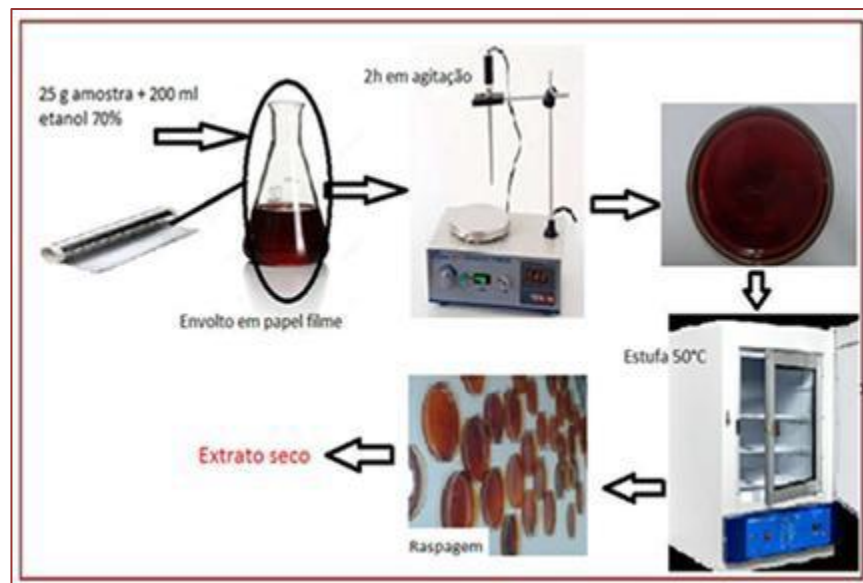
2.1. METODOLOGIA

As matérias-primas (cera de abelha, manteiga de cacau, essências) utilizadas para obtenção das formulações do batom foram obtidas em Farmácia de manipulação e no Comércio de São Paulo/SP. O óleo de coco foi obtido no comércio de Aracaju/SE.

As análises foram realizadas no Laboratório de Análise de Alimentos e no Laboratório de Análise Sensorial - Departamento de Tecnologia de Alimentos (DTA).

2.2. EXTRAÇÃO HIDROALCÓOLICA DO HIBISCO E DA PRÓPOLIS VERMELHA.

Foi realizado a extração hidroalcóolica (25 g amostra/ 200 ml etanol 70%), seguindo a metodologia proposta por Park et al. (2000) com modificações, como mostra a Figura 01.

Figura 01. Preparação do extrato hidroalcólico de própolis e hibisco.

Fonte: Autoria Própria.

O extrato seco de própolis e extrato seco de hibisco foi obtido através da extração hidroalcólica (25 g amostra/ 200 ml etanol 70%) sob agitação por 2 h em agitador magnético em vidro âmbar. Em seguida, a solução foi filtrada em papel filtro, colocada em placas de petri (aproximadamente 10 ml), e estas foram levadas à estufa a 50°C até completa secagem. Após a secagem obteve-se o extrato seco de própolis e hibisco que foram utilizados como antioxidantes naturais, o hibisco, além de ser utilizado como antioxidante natural, foi empregado como corante.

2.3 PREPARAÇÃO DAS FORMULAÇÕES DOS BATONS

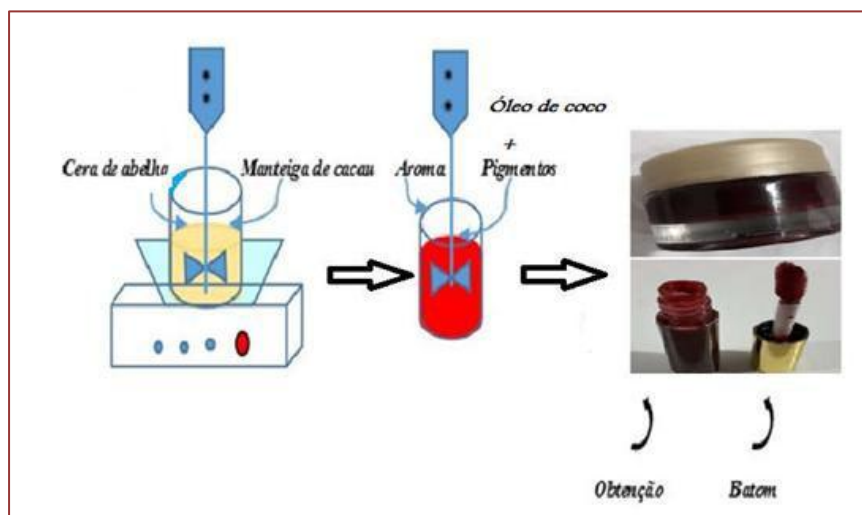
2.3.1. PROCEDIMENTO: BATOM A

As etapas do processo consistiram: (1) Obtenção dos extratos seco de própolis e de hibisco (2) Em um béquer de 200 ml foram adicionados 1,3 g de cera de abelha e 5,5 g de manteiga de cacau e foram aquecidas em placa aquecedora até completa homogeneização. (3) Em um béquer de 10 ml foram adicionados 5 ml de óleo de coco e 0,2g do extrato seco de própolis (etapa 1) até completa dissolução do extrato. (4) Em seguida à mistura de cera de abelha e manteiga de cacau (previamente aquecida) foi adicionada a mistura contendo o extrato de própolis com óleo de coco, denominada base do biobatom. (5) Em um béquer de 5 ml foram misturados 1,5 ml de vinagre de álcool e 1,5 g do extrato seco de hibisco (etapa 1) até completa dissolução do extrato. (6) Adicionou-se a mistura de extrato de hibisco e vinagre de álcool à base do biobatom, sob constante agitação. (7) Adicionou-se na etapa (6) 1 ml da essência desejada. (8) Adicionou-se 0,1 g de bicarbonato de sódio para correção do pH. (9) Finalizando o desenvolvimento do biobatom com tratamento térmico: Resfriou-se a temperatura de aproximadamente 10 a 18°C. (10) Armazenou-se a temperatura ambiente.

2.3.2. PROCEDIMENTO: BATOM B

As etapas do processo consistem: (1) Obtenção dos extratos de hibisco (2) Em um béquer de 200 ml adicionou-se 1,3 g de cera de abelha e 5,5 g de manteiga de cacau e foram aquecidas em placa aquecedora até completa homogeneização. (3) Em um béquer de 10 ml adicionou-se 5 ml de óleo de coco. (4) Em seguida à mistura de cera de abelha e manteiga de cacau (previamente aquecida) foi adicionou-se ao béquer com óleo de coco. (5) Em um béquer de 5 ml misturou-se 1,5 ml de vinagre de álcool e 1,5 g do extrato seco de hibisco (etapa 1) até completa dissolução do extrato. (6) Adicionou-se a mistura de extrato de hibisco e vinagre de álcool à base do biobatom, sob constante agitação. (7) Adicionou-se na etapa (6) 1 ml da essência desejada. (8) Adicionou-se 0,1 g de bicarbonato de sódio para correção do pH. (9) Finalizando o desenvolvimento do batom B com tratamento térmico: Resfriou-se a temperatura de aproximadamente 10 a 18°C. (10) Armazenou-se a temperatura ambiente, de acordo com a Figura 02.

Figura 02. Processamento do batom com própolis e hibisco



Fonte: Autoria Própria.

2.4. ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DOS BATONS

Foram efetuadas análises para caracterização físico-química dos batons. Todas as análises foram feitas em triplicata.

2.4.1. TEOR DE UMIDADE

O teor de umidade foi determinado utilizando analisador de umidade por infravermelho (Modelo IV 2500). A secagem foi realizada em equipamento analítico possibilitando a determinação do teor de umidade de uma amostra sólida.

2.4.2. CINZAS

Foi utilizado o método de incineração em mufla segundo metodologia descrita pelo método 900.02 da official Methods of analysis of the Association of Official Analytical

Chemists (AOAC, 1996). As pesagens foram feitas em balança analítica (Tecnal) com precisão 10-4 kg até a obtenção de peso constante.

2.4.3. pH

Para determinação do pH foi utilizado o método Potenciométrico (Adolfo Lutz, 2005). O pH foi medido em potenciômetro da marca Tecnopon, modelo MPA-210, calibrado com soluções-tampão no pH 4 e 7 a 20°C.

2.5. PROPRIEDADES FÍSICO-MECÂNICA DOS BATONS

2.5.1. TEXTURA

As análises de textura foram obtidas pelo método de TPA (Texture Profile Analysis- Análise do perfil de textura) utilizando um texturômetro modelo CT3, Brookfield com o software Texture Pro CT V1.2 Build 9 e uma célula de carga de 25.000 g de força. No teste de punção, utilizou-se sonda cilíndrica de aço TA3 com diâmetro de 2 mm e comprimento de 20 mm, na proporção de 2 mm /s.

2.6. CARACTERIZAÇÃO ÓPTICA DOS BATONS ELABORADOS

2.6.1. ANÁLISE CALORIMÉTRICA

As leituras da cor foram obtidas com a utilização do colorímetro Color Meter Minolta 200b. Neste sistema de representação de cor, os valores L^* , a^* e b^* descrevem a uniformidade da cor no espaço tridimensional, em que o valor L^* corresponde a quão claro e quão escuro é o produto analisado (0: preto; 100: branco). Os valores de (a^*) correspondem à escala do verde ao vermelho (a^* negativo, verde; a^* positivo, vermelho) e os valores de (b^*) correspondem à escala do azul ao amarelo (b^* negativo, azul; b^* positivo, amarelo). O ângulo Hue (h_o) é o ângulo formado entre a^* e b^* , indicando a saturação da cor do objeto (MINOLTA, 1994).

2.6.2. TESTE PRELIMINAR E DE ESTABILIDADE INTRÍNSECA DOS BATONS

No teste de estabilidade preliminar foram identificadas as características macroscópicas do batom armazenado em frascos de polietileno à temperatura ambiente (aspecto, cor, odor) das formulações segundo a nomenclatura da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA, 2004), conforme segue: N = normal, sem alteração; LM = levemente modificada; presença de cremeado; M = modificada; intenso cremeado e/ou discreta separação de fases; IM = intensamente modificada; intensa separação de fases. A avaliação da estabilidade intrínseca foi realizada preenchendo os tubos com aproximadamente 5 gramas de batons e fechados com papel filme. Após serem mantidas em repouso à temperatura ambiente ($25 \pm 5^\circ\text{C}$), sinais de instabilidade macroscópica como cremação ou separação de fases foram observadas, conforme proposto por ROLAND et al. (2003).

2.6.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados foram analisados pelo programa MiniTab 18 para determinação da análise de variância. Os valores médios e o desvio padrão foram calculados a partir dos dados obtidos

dos ensaios em triplicata. A comparação entre as médias dos tratamentos foi realizada usando-se o teste de Tukey, com nível de confiança de 95%. Os valores médios foram então submetidos ao teste de correlação de Pearson com 95% de confiança.

2.7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.7.1. ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DOS BATONS

Os resultados obtidos das características físico-químicas estão na Tabela 01.

Tabela 01. Características físico-química dos Batons A, B e C

	pH	Cinzas (%g)	%U	Acidez total (ác. Ascórbico)
Batom A	5,52±0,06 ^a	0,68±0,05 ^a	11,19±0,0 ^a	88,97±0,2 ^a
Batom B	5,84±0,05 ^b	0,40±0,00 ^b	10,45±0,0 ^b	65,44±0,21 ^b
Batom C	5,71±0,08 ^c	1,39±0,05 ^c	1,7±0,0 ^c	0,8±0,02 ^c

Todas as amostras apresentam diferença entre si ($p \leq 0,05$) pelo Teste de Tukey.

U- Umidade. A - Batom com própolis; B - Batom sem própolis; C - Batom Comercial

O batom A apresentou pH de $5,52 \pm 0,06$, o batom B de $5,84 \pm 0,05$ e o batom C apresentou pH de $5,71 \pm 0,08$ estatisticamente diferentes entre si, e todos compatíveis com o pH dos lábios que é entre de 5,0 e 6,0 (SOUZA, 2010; GALEMBECK; CSORDAS, 2011).

Ao desenvolver batom de cor vermelha a base de ervas utilizando como ingredientes: óleo de coco, manteiga de cacau, cera de abelha, suco de raiz de beterraba ou bixaorelana, agente de floração, essência de rosas e baunilha obtiveram pH de 6,5 Panda et al. (2018), valor um pouco superior ao pH da saliva.

O resíduo de minerais do batom A foi de $0,68 \pm 0,05\%$ g e do batom B $0,40 \pm 0,01\%$ g, esses resíduos nas amostras processadas são um teste de pureza importante já que pode permitir a identificação do produto. O batom C apresentou resíduo de minerais de $1,39 \pm 0,5$ (Tabela 02). Assim, quando o teor está acima do estabelecido para a maioria das espécies vegetais, indica que a droga vegetal está contaminada com impurezas (FARIAS, 2004). De acordo com a Farmacopéia Brasileira (2010), os valores de cinzas totais geralmente não ultrapassam 12%. No caso dos batons naturais os teores de cinzas estão abaixo de 1% constatando que não há impurezas na composição. Quanto ao teor de umidade, parâmetro que atesta a qualidade de um material, os batons A e B apresentaram teores de umidade de 11,19% e 10,45%, respectivamente, diferentes entre si quando comparados estatisticamente. Já o batom comercial apresentou teor de umidade de $1,7 \pm 0,0$, bastante inferior aos batons desenvolvidos, motivo pelo qual o produto tem alta durabilidade, pois a umidade é considerada o fator mais importante na deterioração de um produto.

A textura é a capacidade do ser humano de reconhecer e avaliar as características intrínsecas de um produto. O objetivo da análise é medir as propriedades mecânicas que está relacionada com as características sensoriais e físicas interferindo no comportamento do produto (BRASEQ, 2019). Dureza é a força necessária para realizar uma dada deformação. O batom A obteve dureza de 44g e o batom B de 130g em torno de 3 vezes o valor do batom A (Tabela 02). Notou-se claramente que o batom com a adição de própolis apresentou maior fragilidade que o batom sem própolis. Goik et al. (2015) ao analisarem a influência da própolis nas propriedades reológicas do batom

perceberam que o batom sem própolis foi caracterizado pela maior dureza (4,2 Pa) e a máxima dureza (5 Pa), corroborando com esse trabalho. O batom C (comercial) apresentou ciclo de dureza de $324 \pm 0,57$ g, superior aos batons desenvolvidos com produtos naturais. De acordo com Kasparaviciene et al (2016) a quantidade de cera de abelha tem maior influência sobre a dureza nas propriedades físicas de batom. Panda et al (2018) ao desenvolver batom à base de ervas obteve ponto de ruptura de 31g, o que demonstrou que a força do batom com ervas foi boa, e o valor encontrado foi inferior ao desta pesquisa (dureza).

Tabela 02. Análise de textura dos batons A, B e C utilizando analisador de textura Brookfield.

Parâmetros	Batom A	Batom B	Batom C
Dureza (g)	$44,33 \pm 1,15^a$	$130,33 \pm 1,52^b$	$324 \pm 0,57^c$
Elasticidade (mm)	$4,83 \pm 0,01^a$	$4,92 \pm 0,02^b$	$4,84 \pm 0,01^a$
Força adesiva (g)	$23,33 \pm 1,51^a$	$56,07 \pm 0,91^b$	$86,16 \pm 1,25^c$
Resiliência	$0,0 \pm 0,0^a$	$0,0 \pm 0,01^a$	$0,01 \pm 0,0^a$

Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). A - Batom com própolis; B - Batom sem própolis; C - Batom Comercial

A elasticidade é a medida da habilidade que uma amostra possui em recuperar sua altura original após remoção da força de compressão (BOURNE, 2002). Os batons A, B e C apresentaram valor de $4,83 \pm 0,01$; $4,92 \pm 0,02$ e $4,84 \pm 0,01$ mm (Tabela 02), respectivamente. Goik et al. (2015) estudaram a elasticidade de um batom com própolis e constataram que o batom com própolis é mais elástico uma vez que o esmagamento ocorre somente após a redução da distância do sensor para $h = 11,8$ mm. Não houve diferença significativa entre o batom A (com própolis) e o batom C (comercial) segundo o teste de Tukey ($p \leq 0,05$). O batom B apresentou elasticidade um pouco superior ao demais batons, ou seja, possui um pouco mais habilidade em recuperar a altura após remoção da força. Isso significa que sob estas condições, o batom é deformado sem causar rachaduras, ou seja, ele pode rachar com maior facilidade. Como o batom desta pesquisa é cremoso, visualmente não foi percebida essa alteração na amostra.

Quanto ao quesito resiliência, que trata de uma propriedade que alguns corpos apresentam de retornar à forma original após terem sido submetidos a uma deformação elástica, os valores obtidos foram muito baixos, pois os batons são cremosos, com aspecto de uma pomada e consequentemente possuem baixíssima resiliência, as amostras não apresentaram diferenças significativas quanto ao teste de Tukey ($p \leq 0,05$), os batons A, B e C apresentaram valores de $0,01 \pm 0,0$; $0,0 \pm 0,01$ e $0,01 \pm 0,0$ (Tabela 02).

O fenômeno adesão é definido como sendo o estado no qual duas superfícies de composição molecular diferentes, se unem por forças de atração, as quais podem ser químicas, mecânicas ou físicas (NAKABAYASHI, PASHLEY, 2000). A força adesiva (g) apresentou diferença significativa quanto ao teste de Tukey ($p \leq 0,05$) nos batons A, B e C que apresentaram valores de $23,33 \pm 1,51$; $56,07 \pm 0,91$ e $86,16 \pm 1,25$, respectivamente (Tabela 02). Pode-se observar que o Batom C, comercial apresentou maior força adesiva, pois em sua constituição são utilizados pigmentos inorgânicos com destaque para os

óxidos de metais e produtos químicos fixadores de coloração. Já os batons livres de produtos químicos possuem baixa força adesiva por utilizarem pigmentos obtidos de fontes naturais.

A cor desempenha um papel relevante na avaliação do consumidor. Os valores das análises colorimétricas (L^* , a^* , b^*) estão expostos na Tabela 04. Não foram observados diferença significativa entre os valores da cor analisado durante o período de armazenamento entre os batons A e B quanto ao Teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Os valores de L^* apresentaram valores entre 28,47 a 31,93 (Tabela 04), estes valores indicam que os batons mantiveram a cor mais escura (0-preto 100-branco). Os valores do parâmetro a^* variaram de 0,93 e 2,67, indicando intensa cor vermelha, o que já era esperado, pois os batons são vermelhos brilhantes e no parâmetro b^* os valores esteve na faixa de 11,2 a 13,43 correspondendo a escala do azul ao amarelo (b^* negativo- azul e b^* positivo- amarelo). O ângulo h^* do círculo cromático (a^* e b^*) indica a saturação da cor, os valores variaram entre 80,96 a 84,66, onde mostra que as amostras tiveram cores com tendência ao vermelho, o que podemos constatar com a coloração do hibisco vermelho e da própolis vermelha, devido à presença de antocianinas, utilizadas na elaboração dos batons. Aher et al., (2012) desenvolveram um batom à base de ervas utilizando um pigmento natural obtido de sementes de Bixaorellana (Bixaceae). Eles desenvolveram seis formulações e apenas a formulação à base de plantas apresentou consistência e pigmentação colorida. Nesta pesquisa os batons formulados com própolis e hibisco apresentaram consistência à pigmentação do hibisco (corante natural).

Tabela 03. Análise calorimétrica dos Batons A- com própolis e B- Sem adição de própolis durante estocagem (75 dias).

Parâmetros	Tempo (dias)					
	T0	T1	T2	T3	T4	T5
L Batom A	31,93±0,75 ^a	28,8±1,24 ^a	28,8±0,11 ^a	28,87±0,20 ^a	29,07±0,72 ^a	29,07±1,93 ^a
L Batom B	31,07±0,76 ^a	28,47±0,90 ^a	28,77±0,28 ^a	30,77±0,28 ^b	30,37±0,47 ^a	31± 0,36 ^a
a Batom A	1,83±0,4 ^a	1,5±0,55 ^a	1,57±0,6 ^a	1,13±0,15 ^a	1,27±0,51 ^a	1,93±0,9 ^a
a Batom B	2,67±0,30 ^a	1,57±0,60 ^a	0,93±0,37 ^a	1,9±0,2 ^a	2±0,26 ^a	2,03±0,31 ^a
b Batom A	11,77±0,55 ^a	10,63±0,11 ^a	11,17±0,05 ^a	11,53±0,15 ^a	11,47±0,2 ^a	13,43±1,44 ^a
b Batom B	12,2±0,26 ^a	11,2±0,21 ^a	11,13±0,05 ^a	11,5±0,1 ^a	11,47±0,11 ^a	12±0,16 ^a
h Batom A	81,36±1,88 ^a	81,7±3,2 ^a	82,13±0,55 ^a	82,3±0,91 ^a	83,33±2,58 ^a	81,86±8,1 ^a
h Batom B	80,96±2,58 ^a	82,46±0,23 ^a	83,26±2,02 ^a	80,53±0,85 ^a	80,11,01 ^a	84,66±9,32 ^a

Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). L^* corresponde a quão claro e quão escuro é o produto analisado (0: preto; 100: branco); a^* correspondem à escala do verde ao vermelho (a^* negativo, verde; a^* positivo, vermelho); b^* correspondem à escala do azul ao amarelo (b^* negativo, azul; b^* positivo, amarelo); h^* é o ângulo formado entre a^* e b^* , indicando a saturação da cor.

Kruthika et al. (2014) desenvolveram seis formulações de batom natural utilizando Pigmentos Coloridos de Beta vulgaris tarot, apenas uma das formulações foi bem sucedida pois fez-se necessário adicionar surfactante e também alterar a fórmula da preparação

para obter um batom natural utilizando pigmento colorido. Azhary et al. (2017) também desenvolveram batom e utilizaram corante natural de rambutan (*Nephelium lappaceum* L.) utilizando a casca de cor vermelha e obtiveram batons de coloração rosa e vermelha. Os batons apresentaram boa estabilidade durante o tempo de estocagem, e no teste de análise sensorial o batom vermelho foi bem mais aceito que o batom de coloração rosácea.

Galvão et al. (2010) estudaram o efeito do batom na cor da resina composta em diferentes tempos de aplicação e observou que os grupos que receberam o batom com ultra fixador mancharam mais que os grupos que receberam batons comuns e que, no entanto, não houve diferença estatística observada para essa diferença de cor. Os batons de fixador comum e ultra-fixador apresentaram maiores valores de coloração em “0 h” e após “24 h” do que após “30 min”, sem diferenças estatisticamente significativas entre “0 h” e “24 h”.

Dash et al., (2017) formulou 4 batons utilizando apenas ingredientes naturais, como extratos das flores de *Hibiscus rosa-sinensis*, suco das raízes de *Beta vulgaris* e pó de mica como corantes e avaliou que das quatro formulações, apenas duas revelaram características ideais de batons com propriedades como brilho, espalhamento e maciez dos lábios após a aplicação, as demais revelaram má pigmentação após a aplicação diferentemente deste trabalho, que os batons apresentaram coloração firme e brilhante.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho alcançou os objetivos desejados quanto o seu desenvolvimento para a aplicação na indústria cosmética, com destaque para a utilização de componentes naturais. Foram desenvolvidas 28 formulações dentre elas foi escolhida a melhor de acordo com os critérios de avaliação sensorial visual se enquadrou. A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que o biobatom possui potencial inovador, e abre perspectivas para estudos de trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

- [1] AHER, A.A., BAIRAGI, S.M., KADASKAR, P.T., DESAI, S.S. AND PRADEEP, K. Formulation and evaluation of herbal lipstick from colour pigments of *Bixa Orellana* (Bixaceae) seeds. **Int. J. Pharm. Pharm. Sci.** 4, 357–359, 2012.
- [2] ANVISA. Agencia Nacional de Vigilância Sanitária, Lei No 6360/976, Resolução No 79/2000.
- [3] AL-SALEH, I; AL-ENAZI, S; SHINWARI, N. Assessment of lead in cosmetics products. **Regulatory Toxicology and Pharmacology**. n.54, p.105-113, 2009.
- [4] AZHARY, D. P.; KARLINDA, B.; CHAERUNISAA, A. Y. Lipstick Formulation to Use a Natural Dye from Rambutan (*Nephelium L appaceum* L.) Rind Extract. **Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences**. v. 8, pg. N°. 59. 2017.
- [5] BANKOVA, V.S. Recent trends and important developments in propolis research. **Evid Based Complement Alternat Med** 2: 29-32, 2005.
- [6] BONVEHÍ, J.S.; COLL, F.V. Phenolic composition of propolis from China and South America. **Zeitschrift für Naturforschung**, v. 49c, p. 712-718, 1994.
- [7] BOURNE, M. **Food texture and viscosity: concept and measurement**. New York: Academic Press. 427 p. 2002.
- [8] CHATTOPADHYAY, P.K. Herbal cosmetics and ayurvedic medicines. **National Inst. Indus. Res.** 2, 45 –50 (2005).

- [9] CHIARI, B. G. et al. Estudo da segurança de cosméticos: presente e futuro. **Rev Ciênc Farm Básica Apl.** vol. 33, n. 3, 2012.
- [10] Dash, G. K.; Amira, N.A.; Anas, M., Shahnaz, M. **Formulation and evaluation of lipsticks containing natural ingredients.** IAJPS, 4 (09), 2017.
- [11] FARIAS, M. R. Avaliação da qualidade de matérias primas vegetais. In: SIMÕES, C. M. O. et al. (Org.). **Farmacognosia: da planta ao medicamento.** 5. ed. revisão. ampliada. Florianópolis: UFSC; Porto Alegre: Ed. da UFRGS, p. 263-288 2004.
- [12] GALEMBECK, F.; CSORDAS, Y. **Cosméticos: a química da beleza.** Disponível em: http://web.ccead.pucrio.br/condigital/mvsl/Sala%20de%20Leitura/conteudos/SL_cosmeticos.pdf. Acesso em: 10 de janeiro de 2019.
- [13] GALVAO, A.P., JACQUES, L.B., DANTAS, L., MATHIAS, P. AND MALLMANN, A. Effect of lipstick on composite resin color at different application times. **J. Appl. Oral Sci.** 18, 566–571, 2010.
- [14] GERSON, J. Fundamentos de Estética, 4. **Milady's Standard**, São Paulo, 2012.
- [15] GOIK, U; PTASZEK, A; GOIK, T. The influence of propolis on rheological properties of lipstick. **International Journal of Cosmetic Science**, 37, 417–424, 2015.
- [16] GOMES, R. K.; DAMAZIO, M. G. **Cosmetologia descomplicando os princípios ativos.** 3. ed. São Paulo: LPM, 2009.
- [17] KASPARAVICIENE, G.; ARUNAS, S.; ZENONA, K.; SAULE, V.; LORETA, K.; JURGA, B. Evaluation of Beeswax Influence on Physical Properties of Lipstick Using 68 Instrumental and Sensory Methods. **Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine.** V8, 2016.
- [18] KORICHI, R., THANCHANT, J.F. Decorative products (capítulo 37 p. 391–406). In: Handbook of Cosmetic Science and Technology (Barel, A.O., Paye, M. and Maibach, H.I., eds), 869 p, 3rd edn. **Informa Health Care**, New York 2009.
- [19] LOPS, G. B. Maquiagem e a sua história milenar – Simbologia na composição. FAAP – Fundação Armando Alvares Penteado – **Faculdade de Artes Plásticas**, São Paulo, 2009.
- [20] MITSUI, T. New cosmetic science. In: Color and Cosmetic Color Materials (Mitsui, T., ed.), pp. 70–98. **Elsevier Science B.V.**, Amsterdam, Netherlands 1997.
- [21] PANDA, S.; DALAPATI, N.; KA, P.K. Preparation and evaluation of Herbal Lipstick. **J Pharm Adv Res**; 1(2):117-119, 2018.
- [22] PARK, Y.K.; IKEGAKI, M.; ALENCAR, S.M. Classificação da própolis brasileira a partir de suas características físico-químicas e propriedades biológicas. **Mensagem Doce**, 58, p.3-7, 2000.
- [23] PEREIRA, A.S.; SEIXAS, F.R.M.S.; NETO, F.R.A. Própolis: 100 anos de pesquisa e suas perspectivas futuras. **Quim. Nova**, 25, pp. 321-326, 2002.
- [24] RIBEIRO, C. Cosmetologia aplicada a dermoestetica. 2. ed. São Paulo: **Pharmabooks**, 2010.
- [25] SAINIO, E.L.; Henriks, M.L.; Kanerva, L.; **Contact Dermatitis**, 42,5, 2000.
- [26] SCHLOSSMAN, M.L. The Chemistry and Manufacture of Cosmetics 2: Formulating. Allured Publishing Corporation, **Carol Stream, IL** 2009.
- [27] SIVAKUMAR, M.K; MOIDEEN, M.M; VARGHESE, R; SHEIK, B; DHANAPAL, C.K. Preliminary phytochemical screening and antibacterial activity of *C. nucifera* L. root. **Res J Pharm Biol Sci**; 2(4):468-77, 2011.
- [28] SOUZA, V. B.; FERREIRA, J. R. N. Desenvolvimento e estudos de estabilidade de cremes e géis contendo sementes e extratos do bagaço da uva Isabel (*Vitis labrusca* L.). **Rev Ciênc Farm Básica Apl**; 31(3):217-222, 2010.

Capítulo 18

Formulação de um biobatom com extrato de própolis e hibisco

Rosângela Maia dos Santos

Annuska Vieira Cabral

Alan Rodrigo Santos Teles

Jucenir dos Santos Ferreira

Tatiana Pacheco Nunes

Gabriel Francisco da Silva

Alessandra Almeida Castro Pagani

Resumo: O batom é atualmente um dos cosméticos mais utilizados pela população e, assim como outros produtos de beleza, está sujeito a contaminação microbiológica devido à presença de componentes orgânicos em sua formulação. Diante das preocupações com a segurança e a sustentabilidade dos batons, cresce o interesse pelos conservantes naturais, capazes de substituir ou reduzir o uso de aditivos sintéticos. Este trabalho teve como objetivo desenvolver um biobatom utilizando compostos bioativos provenientes de fontes naturais como própolis e hibisco. Foram realizadas duas formulações (A, própolis e hibisco e B - cera de abelha, manteiga de cacau, óleo de coco, essência de morango e hibisco. Os batons foram armazenados à temperatura ambiente por 75 dias realizas análises de antioxidantes, oxidativas, estabilidade preliminar e intrínseca, e microbiológica.

Palavras-Chave: Antioxidantes. Batom. Hibisco

1. INTRODUÇÃO

O batom é um produto cosmético que remonta ao período pré-histórico da ornamentação feminina. Sua principal característica é manter a pele bonita e sadia, além de cobrir imperfeições e redefinir os lábios. O termo "batom" (do francês bâton) é um "bastão" constituído basicamente por uma dispersão de corantes e pigmentos, ceras, óleos e silicatos.

Aditivos são adicionados para melhorar o sabor e proteger o produto contra a contaminação microbiológica, oxidação e alterações induzidas pela radiação UV (SCHLOSSMAN, 2009; SOARES, 2012, GERSON, 2012, RIBEIRO, 2010; GOMES et al., 2009).

A maioria da coloração de batom é consequência do uso de corantes e de pigmentos inorgânicos, com destaque para os óxidos de metais, como óxido de ferro, óxido de titânio, pó de cobre, óxido ou hidrato de cromo. Estes pigmentos podem arrastar como impurezas elementos tóxicos como: Arsênio (As), Níquel (Ni), Chumbo (Pb), entre outros. Estes elementos tóxicos e seus compostos quando solúveis em água podem ser parcialmente absorvidos pela pele, principalmente se o cosmético for formulado sob forma pastosa ou líquida (SAINIO, 2000). Utilizados ao longo dos anos por mulheres e crianças, podem promover efeitos indesejáveis aos lábios, como irritabilidade e hipersensibilidade, além de consequências crônicas ao corpo humano. As indústrias de cosméticos estão, cada vez mais, adeptas a produção de produtos naturais (FARIA et al., 2012). A tendência desse mercado é a expansão dos produtos desenvolvidos a partir de extratos naturais, que os mesmos estão relacionados à qualidade de vida em geral, à beleza, ao bem-estar e ao prazer aliados à saúde, a estética a juventude e a aparência saudável (CHIARI et al., 2012). A utilização de própolis, hibisco, óleo de coco, cera de abelha e manteiga de cacau são os componentes essenciais para a elaboração do biobatom. São consideradas fontes potenciais de antioxidantes naturais. O hibisco pode ser considerado uma matriz vegetal com ampla variedade de compostos bioativos, como carotenóides e compostos fenólicos, podendo ser utilizado como corante natural. A adição de própolis tem efeito benéfico nas propriedades do batom como antioxidantes e vitamina C.

Este trabalho teve como objetivo desenvolver um biobatom utilizando compostos bioativos provenientes de fontes naturais como própolis e hibisco.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PRODUTOS COSMÉTICOS

Segundo a Resolução Nº 79, de 28 de agosto de 2000 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), produtos de Higiene Pessoal, Cosméticos e Perfumes são preparações constituídas por substâncias naturais ou sintéticas, de uso externo nas diversas partes do corpo humano, pele, sistema capilar, unhas, lábios, órgãos genitais externos, dentes e membranas mucosas da cavidade oral, com o objetivo exclusivo ou principal de limpá-los, perfumá-los, alterar sua aparência e ou corrigir odores corporais e ou protegê-los ou mantê-los em bom estado (BRASIL, 2000).

O crescimento da indústria da beleza está sendo impulsionado pelo desenvolvimento de pesquisa em ciência e tecnologia usando inovações mais amplas para criar e desenvolver novos produtos de beleza. Os cosméticos apresentam um papel importante nesta indústria por meio da utilização de produtos que proporcione melhoria na aparência do corpo

humano, sendo o batom um desses produtos (KORICHI & THANCHANT, 2009). O uso de batom e a escolha de tons de cores e texturas foi modificada, tornando-se mais ampla (CHATTOPADHYAY, 2005).

Cosméticos faciais como sombras, pó compacto e batons caracterizam-se por possuírem propriedades básicas ou elementares, e são classificados como produtos de grau 1. Para esses, a comprovação não é inicialmente necessária e não requeiram informações detalhadas quanto ao seu modo de usar e suas restrições de uso, devido às suas características intrínsecas. Os critérios para esta classificação foram definidos em função da probabilidade de ocorrência de efeitos não desejados devido ao uso inadequado do produto, sua formulação, finalidade de uso, áreas do corpo a que se destinam e cuidados a serem observados quando de sua utilização (BRASIL, 2000).

O crescimento da indústria da beleza está sendo impulsionado pelo desenvolvimento de pesquisa em ciência e tecnologia usando inovações mais amplas para criar e desenvolver novos produtos de beleza. Os cosméticos apresentam um papel importante nesta indústria por meio da utilização de produtos que proporcione melhoraria na aparência do corpo humano, sendo o batom um desses produtos (KORICHI & THANCHANT, 2009). O uso de batom e a escolha de tons de cores e texturas foi modificada, tornando-se mais ampla (CHATTOPADHYAY, 2005).

O rápido desenvolvimento da ciência da cor permitiu a criação de uma variedade de tons que são utilizados na produção e comercialização de cosméticos. Devido a esta variedade os batons atendem a todos os tipos de preferências quer para modificar, corrigir ou dar aos lábios uma aparência natural (ZEDAYKO, 2011).

Os componentes usados nas formulações de cosméticos para área dos lábios e olhos devem cumprir as especificações de identidade e pureza estabelecidas pelos organismos internacionais de referência, e considera que para os corantes orgânicos artificiais as impurezas máximas permitidas são: arsênico (expresso em As_2O_3) de 3 mg kg⁻¹, chumbo (expresso em Pb) de 20 mg kg⁻¹ e outros metais traços de 100 mg kg⁻¹ (BRASIL, 2000).

As normas da Food and Drugs Administration (FDA) que especificam alimentos e medicamentos, determinam que toda a coloração usada em cosméticos para a área dos olhos e lábios deve ter origem em pigmentos inorgânicos ou corantes naturais. Os pigmentos devem ser purificados e insolúveis em água. Os aditivos para coloração apresentam-se em duas categorias: os aditivos sujeitos a certificação (cores derivadas primeiramente do petróleo ou obtidas sinteticamente a partir de compostos orgânicos) e aqueles isentos de certificação (cores obtidas de fontes minerais, plantas ou animais) (FDA, 2019).

No Brasil ainda não existe em sua legislação, limites máximos de metais traços em relação ao produto acabado. Portanto, recorreu-se a legislação européia, que estabelece limite de um teor máximo de metais traços como Pb (chumbo), Cd (cádmio) e Hg (mercúrio), respectivamente, em 10; 3 e 5 mg Kg⁻¹ em cosméticos (BATISTA et al., 2015). Dentre os vários metais traços, destaca-se o chumbo, o qual possui um efeito tóxico ao ser humano causando efeitos crônicos, neurológicos, hematológicos e renais (AL-SALEH, 2009). Com a evolução da indústria cosmética, os batons podem oferecer, além da cor, proteção dos lábios contra o frio, o vento, o sol e contaminação microbiológica (GOMES, 2009; RIBEIRO, 2010).

Os avanços na tecnologia de cosméticos apresentam tendências como à obtenção de produtos denominados biocosméticos e/ou cosméticos bioativos, o que mostra a

necessidade de pesquisas sobre desenvolvimento de novas formulações com matérias primas de origem vegetal, o que beneficiaria a beleza e a saúde.

2.2. BATOM

Os primeiros relatos de uso de material para realizar pinturas na pele foi há 30 mil anos, através de matérias primas provenientes da natureza, do ocre (cor, variação do marrom) ou de alguma mina de calcário. A natureza sempre foi pródiga fornecedora de matéria prima para a cosmética. Açafrão, hena, terra vermelha, Kohl (carvão), fuligem, índigo, frutas silvestres roxas e vermelhas e outros produtos estão presentes na maquiagem das mulheres na antiguidade (LOPS, 2009).

O batom é responsável pela alteração no aspecto natural dos lábios conferindo um visual diferente, animado, com cor e brilho diferentes. Apresenta como elemento marcante a cor. Ele também proporciona aos lábios melhoria da aparência e proteção às condições externas. O desenvolvimento tecnológico permite a produção de novos tipos de batons com propriedades protetora, hidratante, água e a prova de toque, ervas, totalmente transparentes, etc. (CLERMONT-GALLERANDE et al,1999, MITSUI,1997).

Os componentes usados nas formulações de cosméticos para área dos lábios e olhos devem cumprir as especificações de identidade e pureza estabelecidas pelos organismos internacionais de referência, e considera que para os corantes orgânicos artificiais as impurezas máximas permitidas são: arsênico (expresso em As_2O_3) de 3 mg kg⁻¹, chumbo (expresso em Pb) de 20 mg kg⁻¹ e outros metais traços de 100 mg kg⁻¹ (BRASIL, 2000).

Dentre os vários metais traços, destaca-se o chumbo, o qual possui um efeito tóxico ao ser humano causando efeitos crônicos, neurológicos, hematológicos e renais (AL-SALEH, 2009).

A maquiagem como multifuncionalidade é uma inovação que permite embelezamento inteligente. Os cosméticos para maquiagem atualmente tentam unir a tecnologia e o tratamento para pele maquiada, com efeito acumulativo. Aditivos são incorporados às formulações com FPS (prevenção ao foto envelhecimento), antioxidantes (vitaminas C e E), efeito lifting (tensine®, raffermin® e argireline®), porém, não substitui outros tratamentos estéticos específicos (SILVA, 2012). Os batons são utilizados não somente para acentuar os lábios, mas também como um produto de tratamento, pois contém componentes hidratantes que protegem contra o ressecamento e o fator de proteção solar, que forma um escudo anti raios ultravioleta (CEZIMBRA, 2014).

Os materiais utilizados para elaboração de batom são em sua grande maioria: óleo de rícino, de oliva, de mineral, de gergelim, de manteiga de cacau, de petróleo, de lecitina e de vegetais hidrogenados. As ceras mais comuns são a parafina, a cera de abelha, a carnaúba e a candelila. E um dos corantes bastante utilizados é o ácido brômico, além do óxido de ferro. A mica e o urucum são os corantes (GERSON, 2012).

2.3. TOXICIDADE DE COSMÉTICOS

Com o objetivo de aumentar a vida útil de um cosmético são utilizados conservantes sintéticos que inibem o crescimento microbiano, podendo ocorrer durante a fabricação ou na utilização de uma formulação.

Todos os produtos que entram em contato direto com a pele podem ser absorvidos e

atingir os órgãos internos através da via sistêmica. Os batons que entram em contato com mucosas são ainda mais preocupantes, pois oferecerem o risco de ingestão oral (GONDAL et al., 2010). Os lábios são uma zona de transição entre mucosa bucal e a pele do rosto. Sua epiderme é formada por uma camada fina de células de queratina, permitindo a visualização da vascularização e caracterizando sua coloração rosada (RABELLO, 2004).

Segundo a Safe Cosméticos (2007), uma mulher ingere aproximadamente de 1,8 kg de batom durante toda sua vida. Quando uma mulher, que está usando batom, passa a língua pelos lábios, come ou bebe algo, ela poderá ingerir os componentes presentes nesse cosmético, além de absorvê-los pela mucosa labial (SOARES; NASCENTES, 2013).

Os corantes e os pigmentos utilizados na confecção de batons devem ser igualmente dispersos por toda parte. Além disso, não deve irritar ou causar reações alérgicas, mas fornecer cuidados e proteção para os lábios, formando um filme oleoso, de fácil aplicação e remoção (CLERMONT-GALLERANDE et al, 1999; DESHMUKH, 2013).

Al-Saleh et al. (2009), avaliaram o teor de chumbo em batons de diferentes cores, utilizando a espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP OES). As concentrações de chumbo encontradas estavam em um intervalo de 0,27-3760 mg/ kg. Alguns batons chegaram a 3760 Kg podendo causar efeitos nocivos à saúde e, principalmente, para as crianças que desde muito cedo começam a utilizar este cosmético.

Os parabenos são conservantes bastante utilizados como aditivos alimentares e largamente utilizados na indústria cosmética e em produtos farmacêuticos. Na Europa, esses conservantes foram proibidos em produtos de uso infantil, pois podem ter múltiplos efeitos biológicos, predominando, geralmente, os seus efeitos inibidores sobre transporte da membrana e os processos da função mitocondrial (SONI et al, 2002).

Segundo Błędzka et al. (2014) os parabenos são os conservantes mais comuns usados em produtos cosméticos por diversos fatores, tais como: a) o amplo espectro de atividade contra leveduras, bolores e bactérias; b) a estabilidade química (por um intervalo amplo de temperaturas e valores de pH que variam entre 4,5-7,5; c) inércia; d) baixo grau de toxicidade sistêmica; e) baixa frequência de sensibilização; f) solubilidade suficiente em água (permitindo obter concentração efetiva); g) uso relativamente seguro; h) baixos custos de síntese; i) nenhum odor perceptível ou gosto; j) não causar mudanças na consistência ou coloração dos produtos.

A utilização desse produto químico é aprovada pela Food and Drug Administration (FDA) nos EUA e pelos Regulamentos da União Européia para uso em alimentos. Vale ressaltar que se torna relativamente difícil, encontrar outro produto que seja tão satisfatório quanto o parabeno para ser utilizados pelas indústrias possuindo todos estes pré-requisitos (SONI et al.,2001).

2.4. ANTIOXIDANTES NATURAIS

2.4.1. PRÓPOLIS

A própolis é formada por material resinoso e balsâmico, coletados e processados pelas abelhas, de estrutura complexa, a partir de várias fontes vegetais como, por exemplo, flores, pólen, brotos e exsudados de árvores. Além desses, na colmeia, as abelhas adicionam secreções salivares. Esse produto final é utilizado pelas abelhas para eliminar possíveis

invasores, selar aberturas na colmeia e embalsamar predadores que morrem dentro delas impedindo a proliferação de microrganismos (PEREIRA et al., 2002, BONHEVI et al., 1994, BANKOVA, 2005).

Relatos históricos evidenciam que esse produto é utilizado séculos. Os egípcios utilizavam para embalsamar cadáveres devido as suas propriedades anti-putrefativas. Médicos gregos e romanos como Aristóteles, Dioscorides, Plínio e Galeno reconheceram as propriedades medicinais, e a partir de então extratos da própolis passaram a ser utilizados na medicina popular. Na África do Sul, ao final do século XIX, na guerra, a própolis foi amplamente utilizada devido às suas propriedades cicatrizantes e na Segunda Guerra Mundial em diversas clínicas da ex-União Soviética, a própolis mereceu especial atenção em medicina, com aplicações inclusive no tratamento da tuberculose. (CAPASSO; CASTALDO, 2002; PONTIN et al., 2008, SALATINO 2005, PEREIRA et al, 2002).

Estudos realizados apontam que mais de trezentas substâncias foram identificadas em amostras de própolis de diversas origens. Na própolis vermelha, há predominância de flavonóides: daidzeína, formononetina e biochanina. Essas substâncias são responsáveis pelo mecanismo antioxidante em uma unidade biológica, isto é, tem a capacidade de protegerem o organismo vivo contra o estresse oxidativo que é capaz de iniciar danos celulares e desencadear o envelhecimento cutâneo (LIO et al., 2010; FROZZA et al., 2013).

2.4.2. HIBISCO

O *Hibiscus* sp é um gênero de plantas com flor que agrupa cerca de 300 espécies, com flores e folhas exuberantes. As flores apresentam beleza, perfume, cor e sabor e geralmente são ricas em compostos bioativos como os antioxidantes ((LORENZI et al., 2008; FELIPPE; TOMASI, 2004).

No Brasil, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) por meio da Portaria nº 519, de 1998/15, considera que as flores do hibisco podem ser consumidas como chá, preparadas por meio de infusão ou decocção (BRASIL, 1998).

Essa planta possui agentes antioxidantes como os compostos fitoquímicos que evitam ou retardam a oxidação de um substrato, garantindo a integridade celular e reparando lesões causadas pelos radicais livres (HALLIWELL, 2006). Alguns autores, como Chao e Yin (2009) relatam uma possível relação entre a quantidade de antocianinas e a atividade antimicrobiana do hibisco.

2.4.3. ÓLEO DE COCO

O coqueiro (*Cocos nucifera* L.) pertencente à família Palmae, originário do Sudeste asiático, foi introduzido no Brasil no ano de 1553 onde se apresenta naturalizado 24 em longas áreas da costa nordestina. Proporcionando abundante matéria-prima tanto para as agroindústrias regionais quanto para uso alimentício, é uma planta com expectativa de vida de aproximadamente 100 anos. Possui uma infinidade de usos que vão desde a madeira do tronco, do fruto (coco) que se consome, a semente representada pelo albúmen sólido, ou copra, conhecido como “carne” do coco, e o albúmen líquido que é a água de coco. O coqueiro possui indicação etnobotânica de adstringente, diurético, no tratamento de infecções da pele, trato urinário e disenterias (SIVAKUMAR et al., 2011).

2.4.4. CERA DE ABELHA

A manteiga de cacau é uma gordura comestível natural extraída da semente de cacau, contém antioxidantes naturais, tais como polifenóis que evitam na prevenção do envelhecimento celular e na eliminação de radicais livres, e evitam, também, que ela se torne rançosa permitindo seu armazenamento em um prazo de 2 a 5 anos. É um componente de grande importância na formação do batom, em função de sua composição química e característica física pastosa, é constituída por uma combinação de ácido palmítico, ácido esteárico e ácido oléico (INOVAM, 2010).

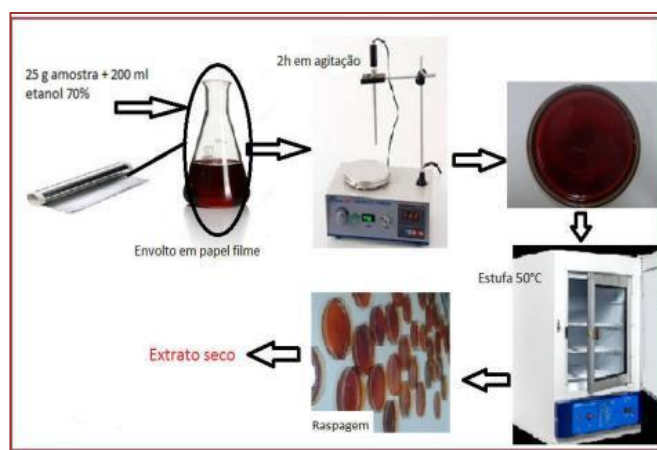
3. MATERIAL E MÉTODOS

As matérias-primas (cera de abelha, manteiga de cacau, essências) utilizadas para obtenção das formulações do batom foram obtidas em Farmácia de manipulação e no Comércio de São Paulo/SP. O óleo de coco foi obtido no comércio de Aracaju/SE. As análises foram realizadas no Laboratório de Análise de Alimentos e Laboratório de Análise Sensorial - Departamento de Tecnologia de Alimentos (DTA).

3.1. EXTRAÇÃO HIDROALCÓOLICA DO HIBISCO E DA PRÓPOLIS VERMELHA.

Foi realizada a extração hidroalcóolica (25 g amostra/ 200 ml etanol 70%), de acordo com a metodologia de Park et al. (2000) com modificações, como mostra a Figura 01.

Figura 01. Preparação do extrato hidroalcóolico de própolis e hibisco.



Fonte: Autoria Própria

O extrato seco de própolis e extrato seco de hibisco foi obtido através da extração hidroalcóolica (25 g amostra/ 200 ml etanol 70%) sob agitação por 2 h em agitador magnético em vidro âmbar. Em seguida, a solução foi filtrada em papel filtro, colocada em placas de petri (aproximadamente 10 ml), e estas foram levadas à estufa a 50°C até completa secagem. Após a secagem obteve-se o extrato seco de própolis e hibisco que foram utilizados como antioxidantes naturais, o hibisco, além de ser utilizado como antioxidante natural, foi empregado como corante.

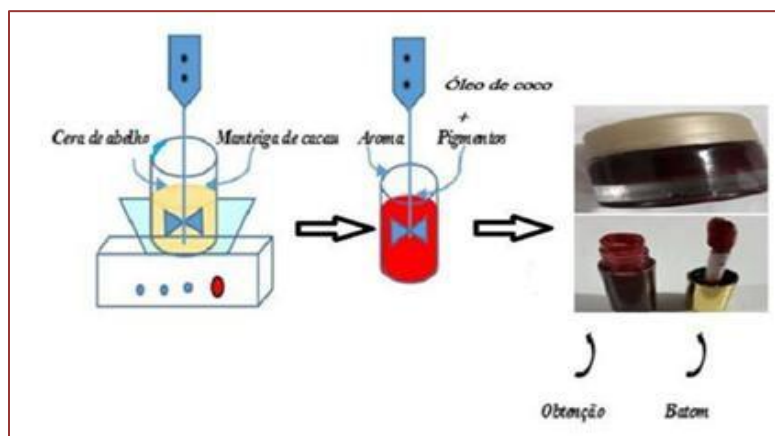
3.2. PREPARAÇÃO DAS FORMULAÇÕES DOS BATONS

3.2.1. PROCEDIMENTO: BATOM A

As etapas do processo consistiram: (1) Obtenção dos extratos seco de própolis e de hibisco (2) Em um béquer de 200 ml foram adicionados 1,3 g de cera de abelha e 5,5 g de manteiga de cacau e foram aquecidas em placa aquecedora até completa homogeneização. (3) Em um béquer de 10 ml foram adicionados 5 ml de óleo de coco e 0,2g do extrato seco de própolis (etapa 1) até completa dissolução do extrato. (4) Em seguida à mistura de cera de abelha e manteiga de cacau (previamente aquecida) foi adicionada a mistura contendo o extrato de própolis com óleo de coco, denominada base do biobatom. (5) Em um béquer de 5 ml foram misturados 1,5 ml de vinagre de álcool e 1,5 g do extrato seco de hibisco (etapa 1) até completa dissolução do extrato. (6) Adicionou-se a mistura de extrato de hibisco e vinagre de álcool à base do biobatom, sob constante agitação. (7) Adicionou-se na etapa (6) 1 ml da essência desejada. (8) Adicionou-se 0,1 g de bicarbonato de sódio para correção do pH. (9) Finalizando o desenvolvimento do biobatom com tratamento térmico: Resfriou-se a temperatura de aproximadamente 10 a 18°C. (10) Armazenou-se a temperatura ambiente.

3.2.2. PROCEDIMENTO: BATOM B

As etapas do processo consistem: (1) Obtenção dos extratos de hibisco (2) Em um béquer de 200 ml adicionou-se 1,3 g de cera de abelha e 5,5 g de manteiga de cacau e foram aquecidas em placa aquecedora até completa homogeneização. (3) Em um béquer de 10 ml adicionou-se 5 ml de óleo de coco. (4) Em seguida à mistura de cera de abelha e manteiga de cacau (previamente aquecida) foi adicionou-se ao béquer com óleo de coco. (5) Em um béquer de 5 ml misturou-se 1,5 ml de vinagre de álcool e 1,5 g do extrato seco de hibisco (etapa 1) até completa dissolução do extrato. (6) Adicionou-se a mistura de extrato de hibisco e vinagre de álcool à base do biobatom, sob constante agitação. (7) Adicionou-se na etapa (6) 1 ml da essência desejada. (8) Adicionou-se 0,1 g de bicarbonato de sódio para correção do pH. (9) Finalizando o desenvolvimento do batom B com tratamento térmico: Resfriou-se a temperatura de aproximadamente 10 a 18°C. (10) Armazenou-se a temperatura ambiente, de acordo com a Figura 02.

Figura 02. Processamento do batom com própolis e hibisco

Fonte: Autoria Própria

3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS COMPOSTOS BIOATIVOS E DA CAPACIDADE ANTIOXIDANTE DOS BATONS ARMAZENADOS

3.3.1. COMPOSTOS FENÓLICOS

Os compostos fenólicos totais foram determinados de acordo com o procedimento convencional espectrofotométrico de Folin-Ciocalteu adaptado por Swain e Hillis (1965) modificado por Thaipong et al. (2006). Todas as análises foram feitas em triplicata.

3.3.2. FLAVONÓIDES TOTAIS

O conteúdo total de flavonoides foi determinado usando o método de Alves (2013). A análise foi feita adicionando 250 µL de cloreto de alumínio (AlCl₃) a 5% em 500 µL do extrato (25mg/10mL de metanol e 4,25mL de metanol). Quanto à absorbância, leu-se a 425 nm após 30 minutos contra um branco, consistindo de uma solução de 4,25mL de metanol com 250µL de cloreto de alumínio (AlCl₃). O conteúdo total de flavonoides foi determinado usando uma curva padrão de quercetina com concentrações entre 5 a 50 µg/mL. O conteúdo total de flavonoides foi expresso como mg de equivalentes de quercetina por grama de extrato de própolis, considerando o teor de extrato seco das mesmas.

3.3.3. ANÁLISE DE VITAMINA C

Foi determinado de acordo com o método nº 43.065 da AOAC (1984), modificado por Benassi & Antunes (1988), substituindo a solução de extração de ácido meta fosfórico por ácido oxálico.

3.3.4. CAROTENOIDES TOTAIS

Os teores de carotenóides foram determinados de acordo com método proposto por Lichtenthaler (1987) expressos em µg/g.

3.3.5. ANTIOXIDANTE

Foram quantificadas a capacidade antioxidante dos batons bioativos por três métodos:

a) FRAP

O potencial redutor dos extratos foi avaliado (FRAP), seguindo o procedimento descrito por Boroski et al. (2015). Os resultados foram expressos em μ mol de sulfato ferroso/g.

b) ABTS

Para a análise da capacidade antioxidante pelo ensaio de ABTS, usou-se metodologia descrita por Rufino et al. (2007). Os resultados foram expressos em μ mol de Trolox equivalente (TE) / g.

c) DPPH

Na análise antioxidante por DPPH, usou-se o método descrito por Boroski et al. (2015). A capacidade de eliminar o radical DPPH (% de Inibição) foi calculada utilizando-se conforme a Equação 1. Utilizou-se álcool metílico, como branco, para calibrar o espectrofotômetro.

$$\%I = \frac{Abs\ controle - Abs\ amostra}{Abs\ controle} \quad \text{Equação 1}$$

3.3.6. ANÁLISE VISUAL E MICROSCÓPICA DOS BATONS

Foi realizada em Microscópio Digital, modelo Dino lite. O batom foi colocado em lâmina coberta com lamínula e visualizada 200X. As imagens foram obtidas através da câmera digital embutida no microscópio, com finalidade de auxiliar na caracterização dos batons.

3.3.7. ANÁLISE DA QUALIDADE MICROBIOLÓGICA DOS BATONS FORMULADOS

Para a determinação da qualidade microbiológica presentes nos batons durante os 75 dias de armazenamento foram realizadas as enumerações de bactérias mesófilas, bolores e leveduras, bem como a pesquisa de *Staphylococcus aureus*, coliformes totais e termotolerantes, Salmonella sp Pseudomonas aeruginosa seguindo as normas da RDC 481/99. Também realizou-se o teste do halo para pesquisa de inibição da *Candida albicans*.

3.3.8. CONTAGEM DE MICRO-ORGANISMOS VIÁVEIS TOTAIS

Para contagem de bactérias mesófilas totais foi utilizado o método de semeadura em profundidade. Para isso, foi inoculado 1 mL da amostra previamente preparada em placa de Petri, e adicionado, separadamente 15-20 mL do ágar adequado para cada contagem. Foram utilizadas as diluições 10⁻¹ e 10⁻² preparadas através da diluição com diluente universal e posterior diluição de 1:100 com solução salina estéril, em duplicata. Para bactérias totais, utilizou-se o meio ágar caseína-soja (Merck®), as placas foram incubadas, de forma invertida, a 30-35°C durante um período de 3-5 dias. Para os bolores e leveduras foi utilizado o meio ágar sabouraud-dextrose (Merck®) e a incubação foi realizada sem inverter as placas, em temperatura de 20-25°C por um período de 5-7 dias.

3.3.9. ANÁLISE QUALITATIVA - PESQUISA DE MICRORGANISMOS

Para a pesquisa de patógenos foi incluída a etapa de pré-enriquecimento em caldo caseína-soja (Merck®), para qual foram transferidos 10 mL da diluição 10⁻¹ da amostra previamente preparada em 90 mL do caldo de pré-enriquecimento não seletivo, o qual foi incubado a 30-35°C, por um período de 18 - 24 horas.

3.3.10. PESQUISA DE *Staphylococcus aureus*

A partir do caldo de pré-enriquecimento não seletivo, com o auxílio de alças bacteriológicas estéreis de 10 µL foi realizado estriamento por esgotamento em ágar manitol - sal (Merck®). As placas foram incubadas de forma invertida, durante 48 h a 30 - 35 °C. A confirmação de crescimento sugestivo em meio ágar manitol-sal foi realizada por meio de avaliação da morfologia por microscopia óptica utilizando o método de coloração de gram e provas de coagulase, utilizando o teste rápido Staphclin® de aglutinação do látex e o teste de aglutinação com plasma de coelho.

3.3.11. PESQUISA DE COLIFORMES TOTAIS E TERMOTOLERANTES

A partir do caldo caseína-soja (Merck®), fez-se esgotamento em estrias, de uma alçada (10µL) em ágar Mac Conkey (Merck®), o qual foi incubado, de forma invertida, por um período de 48 h a 30 - 35°C.

3.3.12. PESQUISA DE *PSEUDOMONAS aeruginosa*

A partir do caldo de pré-enriquecimento não seletivo, foi realizado por esgotamento em estrias de uma alçada em ágar Cetrimide (Merck®), que foi incubado, de forma invertida, por um período de 48 h a 30 - 35°C.

3.3.13. PESQUISA DE *SALMONELLA SP.*

Para pesquisa de *Salmonella sp* transferiu-se 0,5 mL do caldo caseína-soja (Merck®) para 10 mL de caldo Selenito-cystina (Merck®), caldo de crescimento seletivo, o qual foi incubado durante 42 horas a 30-35°C. Deste caldo, foram semeadas, pelo método de esgotamento em estrias, placas de ágar Desoxicolato (Merck®), incubadas de forma invertida, à temperatura de 30-35°C, durante 24 - 48 h.

3.3.14. TESTE DISCO DIFUSÃO

As atividades in vitro no batom A, no batom B, na essência de morango e no óleo de coco foram avaliados mediante teste de halo de acordo com Botre et al. (2010). Foi realizada a atividade antifúngica da *Candida albicans*. Primeiro foi feita a ativação do fungo, onde foi feito o cultivo de 0,1 mL do fungo em 10 mL de caldo BHI a 35°C por 24h. Em seguida 1mL deste inóculo homogeneizado em 100mL de caldo BHI a 35°C por 24h. As culturas ativas foram semeadas em meio Müller-Hinton nos quais 10µL de batom, 10µL da essência de morango, 10µL de óleo de coco e os controles foram colocados em discos de papel filtro de 0,5 cm de diâmetro. Foi utilizado como controle o DMSO (controle). Em seguida as placas foram incubadas à temperatura de 35°C por 24h. Os resultados foram

analisados através dos halos formados ao redor dos discos.

4. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados foram analisados pelo programa MiniTab 18 para determinação da análise de variância. Os valores médios e o desvio padrão foram calculados a partir dos dados obtidos dos ensaios em triplicata. A comparação entre as médias dos tratamentos foi realizada usando-se o teste de Tukey, com nível de confiança de 95%. Os valores médios foram então submetidos ao teste de correlação de Pearson com 95% de confiança.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. CARACTERIZAÇÃO DOS COMPOSTOS BIOATIVOS E DA CAPACIDADE ANTIOXIDANTE DOS BATONS ARMAZENADOS

A Tabela 01 apresenta os resultados para análises de compostos antioxidantes dos batons armazenado à temperatura ambiente por períodos de 0, 15, 30, 45, 60 e 75 dias.

As duas amostras de batom (A- com própolis e B- sem própolis) apresentaram diferenças significativas quando comparadas estatisticamente pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). No batom C, comercial, não foram encontrados compostos antioxidantes e/ou apenas traços, certamente pela composição em produtos químicos. No desenvolvimento de um produto, a avaliação da estabilidade é de muito importante uma vez que avalia o tempo em que os compostos antioxidantes são mantidos e a qualidade microbiológica do produto.

De acordo com a tabela 01, as duas amostras de batom apresentaram altos conteúdos em compostos fenólicos, principalmente o produto A ($273,52 \pm 10,37$ (mg (EAG)/g)) devido à combinação de hibisco e própolis, o produto B ($222,54 \pm 9,90$ (mg (EAG)/g)) que contém apenas hibisco. Durante o armazenamento a concentração caiu de $273,52 \pm 10,37$ para $133,33 \pm 1,35$ (mg (EAG)/g) produto A e o B de $222,54 \pm 9,90$ para $85,06 \pm 1,50$ A (mg (EAG)/g), respectivamente. Apesar da queda os produtos continuaram com altos conteúdos em compostos fenólicos, principalmente o batom A, quando comparamos à própolis e ao hibisco $246,73 \pm 6,86$ e $144,68 \pm 4,87$ (mg (EAG)/g) (Tabela 01), respectivamente durante o armazenamento.

Os compostos fenólicos são um importante grupo de compostos fitoquímicos muito pesquisado por vários cientistas atualmente. Diversos estudos determinam que a atividade antioxidante de várias espécies vegetais é proporcionada principalmente pela presença dessas substâncias, estas características são observadas devido à propriedade oxido-redução, dessa forma essas substâncias possibilitam o desempenho de um importante papel na absorção e neutralização de radicais livres (LEMOS, 2008).

Estes compostos antioxidantes são caracterizados como compostos que podem retardar ou inibir as reações de oxidação provocadas pelas espécies reativas de oxigênio (ERO) e das espécies reativas de nitrogênio (ERN). As espécies reativas de oxigênio são compostos químicos resultantes da ativação ou redução do oxigênio molecular (HALLIWELL, 2006).

Estudos apontam que os flavonóides representam uma barreira química de defesa contra insetos e outros animais herbívoros. Pode-se observar que os batons apresentaram valores $(195,56 \pm 23,65(\text{mg (EAG)}/\text{g})$ e $264,37 \pm 30,77(\text{mg (EAG)}/\text{g})$ deste antioxidante quando comparamos com a própolis e o hibisco, respectivamente (Tabela 01). No tempo 0, o batom A apresentou $342,81 \pm 12,07$ e o batom B $246,73 \pm 14,05(\text{mg (EAG)}/\text{g})$ (Tabela 01), respectivamente.

Quanto aos carotenóides, o batom A apresentou maior teor de antioxidante possivelmente devido à composição da própolis $(232,46 \pm 26,56 \mu \text{g}/\text{ml})$ (Tabela 01) ao produto. Esses teores foram diminuindo durante o período de armazenamento, de $251,69 \pm 11,43 \mu \text{g}/\text{ml}$ para $43,68 \pm 4,43 \mu \text{g}/\text{ml}$ e o batom B, de $112,19 \pm 12,67 \mu \text{g}/\text{ml}$ para $16,59 \pm 3,87 \mu \text{g}/\text{ml}$, respectivamente (Tabela 01). Observamos durante o armazenamento que os batons perderam a cor brilhante e fixadora no tempo 5, corroborando com a queda observada dos carotenóides observadas neste tempo.

O ensaio antioxidante de determinação do poder de redução do íon ferro (FRAP) apresentou valores elevados para as duas amostras de batom. O batom A apresentou $58.638,89 \pm 104,33 \mu \text{mol}$ de sulfato ferroso/g e o batom B, $53.805,56 \pm 102,3 \mu \text{mol}$ de sulfato ferroso/g (Tabela 01). Durante o período de armazenamento os valores caíram para $5.075,16 \pm 26,08 \mu \text{mol}$ de sulfato ferroso/g e $3.539,21 \pm 21,45 \mu \text{mol}$ de sulfato ferroso/g, respectivamente (Tabela 01). Esses produtos apresentaram valores elevados, principalmente, devido ao constituinte hibisco que apresentou valor de $21.083,30 \pm 166,67 \mu \text{mol}$ de sulfato ferroso/g, própolis $7.282,39 \pm 8,72 \mu \text{mol}$ de sulfato ferroso/g e a essência de morango $5.669,67 \pm 30,67 \mu \text{mol}$ de sulfato ferroso/g (Tabela 01).

Quanto à % inibição, método que se baseia na transferência de elétrons por ação de um antioxidante, pode ser monitorada durante o armazenamento, a partir dos resultados obtidos determinou-se a porcentagem de atividade antioxidante ou sequestradora de radicais livres, os resultados foram muito baixos, apesar da riqueza em antioxidantes da própolis ($90,02 \pm 1,03\%$) e do hibisco ($55,37 \pm 0,36\%$) (Tabela 01). O batom A apresentou decréscimo de $15,37 \pm 3,06$ no tempo 0 para $4,87 \pm 2,11\%$ no tempo 5 e o batom B apresentou valor de $10,36 \pm 2,43$ no tempo 0 e decaiu para $4,41 \pm 0,28\%$ no tempo 5 (Tabela 01). Talvez, baixa biodisponibilidade pode ser explicada pela alta quantidade de carotenóides nas amostras de batom, segundo alguns autores os carotenóides podem atuar como interferentes na análise. E como podemos observar na Tabela 06, também houve queda brusca de carotenóides durante o período de armazenamento e, também, o decréscimo em ambos os batons devido ao armazenamento e a embalagem utilizada. Há algumas críticas referentes ao ensaio DPPH de que essa espécie não é encontrada em sistemas biológicos, e, portanto, não é representativa do comportamento *in vivo*.

Tabela 1. Análise de compostos antioxidantes do batom armazenado à temperatura ambiente.

Análises	Tempo 0	Tempo 1	Tempo 2	Tempo 3	Tempo 4	Tempo 5
Fenóis Batom A (mg EAG/G)	273,52±10,37	238,23±10,01	223,85±9,05	166,56±7,8	157,69±1,50	133,33±1,35
Fenóis Batom B (mg EAG/G)	222,54±9,90	195,09±10,54	193,79±7,31	144,41±5,33	105,06±4,39	85,06±1,50
Flavonóides Batom A (mg EAG/G)	342,81±12,07	259,81±12,07	240,85±14,06	228,44±23,09	83,63±10,15	44,5±5,08
Flavonóides Batom B (mg EAG/G)	246,73±14,05	208,16±13,98	221,24±8,38	206,87±12,67	77,83±6,87	21,31±5,25
Carotenoides Batom A (μ/ml)	251,69±11,43	225,35±13,87	186,94±9,06	78,97±8,43	43,68±4,43	27,15±2,6
Carotenoides Batom B (μ/ml)	112,19±12,67	100,93±12,36	68,33±8,45	38,57±7,89	16,59±3,87	4,21±2,89
FRAP Batom A (μ mol de sulfato ferroso/g)	58638,89 ±104,33	53630,0 ±99,87	25083,33 ±67,87	9388,88±67,9	5486,92±22,5	5075,16±26,08
FRAP Batom B (μ mol de sulfato ferroso/g)	53805,56 ±102,3	51305,56±12 6,78	21972,22 ±98,56	7826,79 ±54,96	4617,67 ±28,74	3539,21±21,45
%Inibição Batom A	15,37±3,06	12,56±1,05	11,24±0,61	10,11±1,34	8,89±2,30	4,87±2,11
%Inibição Batom B	10,36±2,43	8,42±2,12	6,89±1,52	6,5±0,19	5,40±1,66	4,41±0,28
ABTS Batom A (μ mol DE trolox g de amostra)	2959,0 ±105,95	2386,20 ±91,98	2017,13 ±67,04	1251,79 ±32,49	627,29±48,65	435,10±10,52
ABTS Batom B (μ mol DE trolox g de amostra)	2100,18 ±82,91	1956,96 ±75,89	1183,72 ±45,91	616,71±26,54	444,87±20,43	150,11±34,89

Todas as amostras apresentam diferença estatisticamente significativa entre si, ($p \leq 0,05$) pelo Teste de Tukey. A - Batom com própolis; B - Batom sem própolis; C

Quanto ao ABTS, durante o armazenamento, os batons A e B no tempo 0 apresentaram valores de 2959±105,95 e 2100,18±82,91 μ mol de trolox mL (Tabela 01), e até o tempo 03 os resultados foram satisfatórios para a amostra A e até o tempo 02 para a amostra B (Tabela 06), depois foi observado uma diminuição nos valores para 435,10±10,52 e 150,11±34,89 μ mol de trolox mL (Tabela 01) no tempo 05. Com base nestes dados, evidencia-se que durante a estocagem a capacidade antioxidante do batom A é mais eficiente até o tempo 03 e o batom B até o tempo 02, principalmente devido à adição da própolis durante o processamento. Uma das vantagens da determinação do ABTS, durante a análise, é que a mesma é realizada na região de 734nm próxima ao infravermelho, o que diminui as interferências de vários pigmentos que absorvem radiação eletromagnética em comprimentos de onda menores e de compostos

resultantes de reações secundárias. Amostras ricas em antocianinas, por exemplo, podem ser analisadas por este método, pois absorvem radiação até 650nm (KUSKOSKI et al, 2004).

5.2. MICROSCOPIA DO BIOBATOM

Observou-se na Figura 03 que ao ser aplicado nos lábios o batom A obteve uma boa distribuição e brilho, entretanto quando comparado ao batom C, comercial este apresentou uma menor intensidade no brilho (Figura 03, Figura 04), embora as duas amostras sejam classificadas como gloss. As Figuras 05 (batom A) e 06 (batom B) apresentam o aspecto das amostras através da análise de microscopia desses batons nos lábios, concluindo ser necessário melhorar fixação do batom A. Talvez aumentando, por exemplo, a concentração do pigmento, pois o batom comercial apresentou uma melhor fixação e uma maior intensidade na cor. Isso se deve, também, aos diversos produtos químicos adicionados e o batom A, é um produto natural, sem adição de produtos químicos.

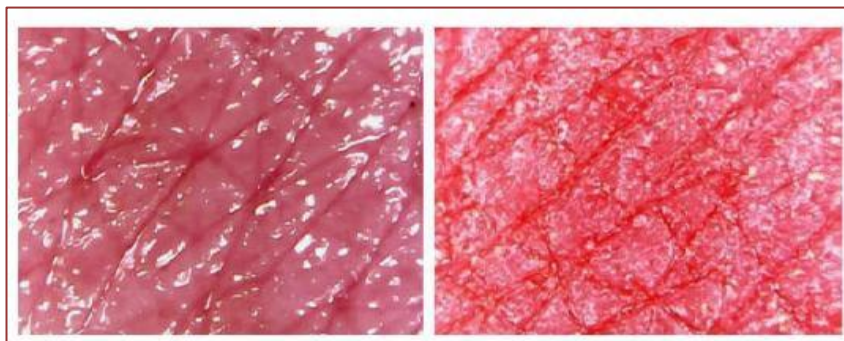
Figura 03. Biotatom

Figura 04. Batom C(comercial)



Figura 05. Foto do batom A (200x)

Figura 06. Foto do batom comercial (200x)



Para Costa e colaboradores (2004) uma emulsão estável é obtida com proporções adequadas de tensoativos e correto processo de emulsificação. A partir destas imagens, foi possível observar que as emulsões apresentam uniformemente distribuídos. As amostras não apresentam pontos de coalescência (200X) o que indica uma formulação estável e no caso do batom A, uma tonalidade brilhante, possivelmente devido à incorporação de óleo de coco ao produto.

5.3. ANÁLISE DA QUALIDADE MICROBIOLÓGICA DOS BATONS FORMULADOS

A análise da qualidade microbiológica de cosméticos, perfumes e produtos para higiene pessoal é necessária para verificar a ausência de micro-organismos patogênicos que causam risco ao consumidor, além de determinar a carga microbiana viável presente no produto (BRASIL, 1999). A RDC nº. 481, de 23 de setembro de 1999 (ANVISA) foi implantada devido à necessidade da criação de padrões microbianos de qualidade e a necessidade de compatibilizar os regulamentos nacionais com os instrumentos harmonizados no âmbito do Mercosul, com o objetivo de aperfeiçoar as ações de controle de produtos sujeitos à Vigilância Sanitária e às ações de proteção ao consumidor.

A investigação da qualidade microbiológica dos batons A e B, durante 75 dias de armazenamento, pode ser observada nas Tabelas 07 e 08, respectivamente.

Tabela 02. Pesquisa de microrganismos patogênicos do Batom A e do Batom B.

Bactérias	Batom A e B	Unid.	Res. RCD 481/199
Pesquisa de <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ;	Ausente/g	Aus/Pres em g	Ausência
Pesquisa de <i>Staphylococcus aureus</i> ;	Ausente/g	Aus/Pres em g	Ausência
Pesquisa de <i>Salmonella</i> sp	Ausente/g		N. A

A - Batom com própolis; B - Batom sem própolis. N.A.-Teste não apropriado para batom

Tabela 03. Contagem de micro-organismos aeróbios totais (UFC/g) do Batom A e do Batom B.

Microrganismos	Batom A e B	Unid.	Res. RCD 481/199	Unid.
Contagem de bactérias	<10	UFC/g est.	N. A	UFC/g est.
Contagem total de microrganismos mesófilos viáveis	<10	UFC/g est.	Até 500	
Pesquisa de coliformes totais	Ausente/g		N. A	UFC/g ou mL

A - Batom com própolis; B - Batom sem própolis. N.A.-Teste não apropriado para batom.

Tabela 04. Contagem de bolores e leveduras do batom A e do batom B

Microrganismos	Batom A e B	Unid	Res. RCD481/199	Unid
Bolores e Leveduras	<10	UFC/gest	N. A	UFC/gest

A - Batom com própolis; B - Batom sem própolis. N.A.-Teste não apropriado para batom.

Não foram observadas colônias de qualquer microrganismo analisado durante o período de estocagem. A contagem total de micro-organismos mesófilos viáveis foram < 10 UFC/g est. (Tabela 03) durante todo armazenamento, de acordo com a resolução RDC. 481/1999 é permitido até 500 UFC/g ou mL. Quanto à contagem de bactérias, a contagem de bolores e leveduras os resultados foram <10 UFC/g est. e ausência de *Salmonella* sp., *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus* e para a pesquisa de coliformes totais

(Tabela 02), durante todo período de armazenamento.

De acordo a Resolução nº 481, de 23 de setembro de 1999, os produtos cosméticos sujeitos à contaminação microbiológica possuem como limites de aceitação, em termos de micro-organismos aeróbios viáveis totais, não mais que 103 UFC/g ou mL, sendo o limite máximo de 5×10^3 UFC/g ou mL (BRASIL, 1999). Os batons elaborados não apresentaram contaminação microbiológica, evidenciando que os produtos foram elaborados em condições sanitárias satisfatórias.

Estudos evidenciam que a própolis possui um efeito significativo contra bactérias como *Enterococcus* sp., *Escherichia coli* e *Staphylococcus aureus* (AL-Waili et al., 2012, KASIOTIS et al., 2017, KUROPATNICKI et al., 2013, SILICI e KUTLUCA, 2005). Essa atividade antibacteriana ocorre devido aos seus compostos ativos, como compostos aromáticos e flavonóides (PAROLIA et al., 2010).

Extratos etanólicos de própolis, também, mostraram-se eficazes contra bactérias gram-positivas e apresentaram um efeito limitado contra bactérias gram-negativas (AHUJA e AHUJA, 2011; FOKT et al., 2010; HARFOUCH et al., 2016; MARTINOTTI e RANZATO, 2015; WAGH, 2013).

De acordo com Salomao et al. (2008) a própolis brasileira é mais efetiva contra as bactérias Gram-positivas em comparação com as bactérias Gram-negativas. Ela, também, apresenta atividade antibacteriana contra algumas bactérias aeróbias como *Bacillus cereus*, *B. subtilis*, *Enterococcus faecalis*, *Micrococcus luteus*, *Nocardia asteroides*, *Rhodococcusequi*, *Staphylococcus auricularis*, *S. epidermidis*, *S. capitis*, *S. haemolyticus*, *S. warnerii*, *S. mutans*, *S. hominis*, *Streptococcus cricetus*, *St. faecalis*, *St. pyogenes*, *St. pneumoniae*, *St. sobrinus* e *St. viridians* (FOKT et al., 2010).

Na Figura 07, pode-se visualizar o teste de inibição do halo, um método qualitativo usado para avaliar a atividade antimicrobiana ou antifúngica de qualquer microrganismo. Neste estudo analisou-se a atividade antifúngica *Candida albicans* no batom A, no batom B, na essência de morango e no óleo de coco utilizado no desenvolvimento dos batons. Pode-se verificar que não houve formação de halo ao redor do disco nas amostras de batom e no óleo de coco, apenas um pequeno halo de aproximadamente 0,1mm da amostra de essência do morango utilizada para promover aroma aos batons. Nesta pesquisa, provavelmente, devido aos demais ingredientes utilizados como a manteiga de cacau, o óleo de coco e a cera de abelha, dificultaram a ação antifúngica da própolis ao fungo analisado, pois a ação da própolis sobre leveduras de diferentes espécies de *Candida* tem mostrado efeitos fungistático e fungicida satisfatórios, tanto em experiência *in vitro* quanto *in vivo*.

Rojas e Lugo (1988) demonstraram a presença de atividade antifúngica um extrato alcoólico de própolis contra 23 cepas de leveduras do gênero *Candida* isoladas de diferentes materiais biológicos, com ação fungistática a baixa concentrações (0,85mg / ml por 2 horas de tratamento e 0,55mg / ml por 24 horas de tratamento).

Ota et al. (1994), em um estudo de *Candida albicans* sensibilidade aos extratos puros de própolis (PPE), observou-se que o mínimo concentrações fungicidas contra as 15 estirpes testados variou de 3 a 7 mg / ml, indicando sua possível uso na prevenção de doenças orais.

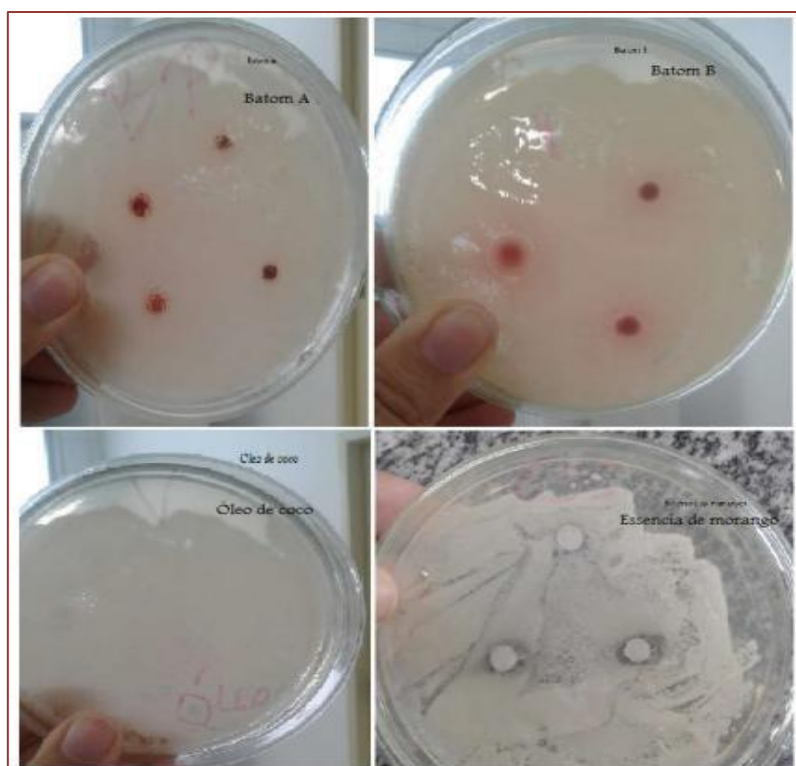
Siqueira et al. (2015) avaliaram o efeito fungistático e fungicida do extrato alcoólico de própolis vermelha sobre microrganismos isolados de casos de periodontite crônica comparada com a Clorexidina (CHX) *in vitro Candida albicans*, *Candida tropicalis* e *Candida*

glabratae constataram efeito fungistático e fungicida satisfatório na maioria das cepas estudadas, sugerindo futuras aplicações clínicas para o tratamento da periodontite.

Gavanji e Larki, (2015) avaliaram a efeito antifúngico do extrato de própolis e compararam os resultados com os antifúngicos padrões para tratamento da *candidíase in vitro* de *Candida albicans* e concluíram atividade antifúngica positiva para *Candida albicans*

Recentemente, Freires et al. (2016) determinaram a atividade antifúngica da própolis brasileira (tipo 3 e 13) e seus efeitos sobre a morfologia de biofilmes de *Candida* pré-formados e maduros *in vitro* de *C. albicans*, *C. dubliniensis*, *C. glabrata*, *C. krusei*, *C. tropicalis* e *C. parapsilosis* e verificou que os extratos da própolis 3 e 13 tem atividade anti-*Candida* e deve ser considerado como forte promissora para o tratamento da infecção fúngica.

Figura 07. Halos de inibição (Batom A e B)



Fonte: Autoria Própria

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os componentes utilizados para desenvolver o batom natural podem ser considerados fontes potenciais de antioxidantes naturais a serem explorados com o objetivo de promover a saúde. O hibisco pode ser considerado uma matriz vegetal com ampla variedade de compostos bioativos, como carotenóides e compostos fenólicos, podendo ser utilizado como corante natural. A adição de própolis tem efeito benéfico nas propriedades do batom como antioxidantes e vitamina C.

Pode-se evidenciar que os batons são ricos em compostos bioativos. O óleo de coco extra

virgem utilizado como base no desenvolvimento dos batons e antioxidantes também contribuiu para enriquecer ainda mais os batons em compostos bioativos. As duas amostras de batom são ricas em compostos fenólicos, principalmente o Batom A devido à combinação de hibisco e própolis.

As características microbiológicas dos batons fornecem informações valiosas quanto ao tempo de armazenamento dos batons. Os resultados dessa pesquisa mostram que é possível desenvolver produtos cosméticos totalmente naturais com bom potencial para comercialização.

REFERÊNCIAS

- [1] AL-SALEH, I; AL-ENAZI, S; SHINWARI, N. Assessment of lead in cosmetics products. **Regulatory Toxicology and Pharmacology**. n.54, p.105-113, 2009.
- [2] ANVISA. Agência Nacional de Vigilância Sanitária, Lei No 6360/976, Resolução No 79/2000.
- [3] BANKOVA, V.S. Recent trends and important developments in propolis research. **Evid Based Complement Alternat Med** 2: 29-32, 2005.
- [4] BURDOCK, G. A.. Review of the biological properties and toxicity of bee propolis (propolis). **Food and Chemical Toxicology**. 36, 347-363. 1998.
- [5] BONVEHÍ, J.S.; COLL, F.V. Phenolic composition of propolis from China and South America. *Zeitschrift für Naturforschung*, v. 49c, p. 712-718, 1994.
- [6] BOROSKI, M.; VISENTAINER, J. V.; COTTICA, S. M.; MORAIS, D. M. de. Antioxidantes princípios e métodos analíticos. Curitiba: **Appris**, 2015. 1ª ed.
- [7] BRASIL. Ministério da Saúde, Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC nº 481, de 23 de setembro de 1999. Parâmetros de Controle Microbiológico para os Produtos de Higiene Pessoal, Cosméticos e Perfumes. Disponível em: Acesso em: 29 set. 2010.
- [8] CHATTOPADHYAY, P.K. Herbal cosmetics and ayurvedic medicines. **National Inst. Indus. Res.** 2, 45 –50 (2005).
- [9] CHAO C.Y, YIN M.C. Antibacterial effects of Roselle Calyx extracts and protocatechuic acid in ground beef and apple juice. **Food born Pathog Dis.** 6(2):201-6; 2009.
- [10] CHIARI, B. G. et al. Estudo da segurança de cosméticos: presente e futuro. **Rev Ciênc Farm Básica Apl.** vol. 33, n. 3, 2012.
- [11] COSTA, C K. et al. Um estudo da pele seca: produtos emulsionados para seu tratamento e busca de sensorial agradável para o uso contínuo. v. 5, n. 2, p. 69-78, Curitiba, 2004.
- [12] DESHMUKH, S., SUTAR, M., SINGH, S., KANADE PAWANKUMAR, M., PANKE, D., GANESH, N. Formulation and evaluation of natural lip- sticks prepared from Bixaorellana seeds and Beta vulgaris root extract and their comparative study. **Int. J. Pharm. Biol. Sci.** 4, 68 –70 (2013).
- [13] FDA. FOOD AND DRUG ADMINISTRATION. In: WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. Flórida: Wikimedia Foundation, 2019. Disponível em: Acesso em: 17 abr. 2019
- [14] FELIPPE, G. M.; TOMASI, M. C. Entre o jardim e a horta: as flores que vão para a mesa. 2. ed. São Paulo: **SENAC**, 2004. 286 p.
- [15] FREIRES IA, QUEIROZ VCPP, FURLETTI VF, IKEGAKI M, ALENCAR SM, DUARTE MCT. ROSALEN, PL. Chemical composition and antifungal potential of Brazilian propolis against Candida spp. **Journal Mycol. Med**; 26(2):122-132, 2016.
- [16] FROZZA, C.O.S., GARCIA, C.S.C., GAMBATO, G., et al.. Chemical characterization, antioxidant and cytotoxic activities of Brazilian red propolis. **Food Chem. Toxicol.** 52, 137– 142, 2013.
- [17] GAVANJI S, LARKI B. Comparative effect of propolis of honey bee and some herbal extracts on Candida Albicans. Chin. **Journal Integr Med**: 23(3):1-7, 2015.
- [18] GERSON, J. Fundamentos de Estética, 4. **Milady's Standard**, São Paulo, 2012.

- [19] GOMES, R. K.; DAMAZIO, M. G. Cosmetologia descomplicando os princípios ativos. 3.ed. São Paulo: **LPM**, 2009.
- [20] HALLIWELL, B. Reactive species and antioxidants: redox biology is a fundamental theme of aerobic life. **Plant Physiology, Rockville**, v. 141, n. 2, p. 312-322, 2006.
- [21] KORICHI, R., THANCHANT, J.F. Decorative products (capítulo 37 p. 391-406). In: Handbook of Cosmetic Science and Technology (Barel, A.O., Paye, M. and Maibach, H.I., eds), 869 p, 3rd edn. **Informa Health Care**, New York (2009).
- [22] KUSKOSKI, E. M.; ASUERO, A. G. GARCIA-PARILLA, M.C. TRONCOSO, A.M.; FETT, R. Actividad antioxidante de pigmentos antociánicos. **Ciência e tecnologia de Alimentos**, v.24, n 4, p. 691-693, 2004.
- [23] LEMOS, A. R. Caracterização Físico-Química, Bioquímica e Avaliação da Atividade Antioxidante em Genótipos de Urucueiros (*Bixa Orellana* L.). Itapetinga – BA: UESB, 2008. 65p. (Dissertação – Mestrado em Engenharia de Alimentos – Engenharia de Processos de Alimentos).
- [24] LICHTENTHALER, H.K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. **Methods of Enzymology**, v.148, p.350-382. 1987.
- [25] LIU K.S, TSAO S.M, YIN M.C. In vitro antibacterial activity of roselle calyx and protocatechuic acid. **Phytother Res.** 19:942-5, 2005.
- [26] LOPS, G. B. Maquiagem e a sua história milenar – Simbologia na composição. FAAP – Fundação Armando Alvares Penteado – **Faculdade de Artes Plásticas**, São Paulo, 2009.
- [27] LORENZI H. Plantas ornamentais no Brasil: arbustivas, herbáceas e trepadeiras. 4a ed. Nova Odessa, **Instituto Plantarum**. 1130 p., 2008.
- [28] MITSUI, T. New cosmetic science. In: Color and Cosmetic Color Materials (Mitsui, T., ed.), pp. 70-98. **Elsevier Science B.V.**, Amsterdam, Netherlands (1997).
- [29] OTA, C.; KHOURI, S.; JORGE, A.O.C.; UNTERKIRCHER, C.S.; SHIMIZU, M.T. Atividade fungicida da própolis sobre a *Candida albicans* isoladas da cavidade bucal. In: XI Reunião Anual da SBPQO. A'guas de São Pedro, 04-07 set. 1994. São Paulo, 1994, p.29.
- [30] PARK, Y.K.; IKEGAKI, M.; ALENCAR, S.M. Classificação da própolis brasileira a partir de suas características físico-químicas e propriedades biológicas. **Mensagem Doce**, 58, p.3-7, 2000.
- [31] PEREIRA, A.S.; SEIXAS, F.R.M.S.; NETO, F.R.A. Própolis: 100 anos de pesquisa e suas perspectivas futuras. **Quim. Nova**, 25, pp. 321-326, 2002.
- [32] PONTIN, K.; DA SILVA FILHO, A.A.; SANTOS, F.F.; SILVA, M.L.A.; CUNHA, W.R.; NANAYAKKARA, N.P.D.; BASTOS, J.K.; DE ALBUQUERQUE, S.. In vitro and in vivo antileishmanial activities of a Brazilian green propolis extract. **Parasitology Research**, v. 103, n. 3, p. 487-492, 2008
- [33] RIBEIRO, C. Cosmetologia aplicada a dermoestetica. 2. ed. São Paulo: **Pharma books**, 2010.
- [34] SAINIO, E.L.; Henriks, M.L.; and Kanerva, L.; **Contact Dermatitis**, 42,5, 2000.
- [35] SALATINO, A. Origin and chemical variation of brasilianpropolis. **Evid Based Complement Alternat Med** 2: 33-38, 2005.
- [36] SCHLOSSMAN, M.L. The Chemistry and Manufacture of Cosmetics 2: Formulating. Allured Publishing Corporation, **Carol Stream**, IL (2009).
- [37] SILVA, S. K. **Diferenciais tecnológicos na maquiagem do século XXI**, João Pessoa, 2012.
- [38] SOARES, A.K.A; CARMO, G.C; QUENTAL, D.P; NASCIMENTO, D.F; BEZERRA, F.A.F; MORAES, M.O; MORAES, M.E.A. Avaliação da segurança clínica de um fitoterápico contendo *Mikaniaglomerata*, *Grindelia robusta*, *Copaifera officinalis*, *Myroxylon toluifera*, *Nasturtium officinale*, própolis e mel em voluntários saudáveis. **Rev Bras Farmacogn** 16: 447- 454, 2006.
- [39] THAIPONG, K.; BOONPRAKOB, U.; CROSBY, K; CISNEROSZEVALLOS, L.; BYRNE, D.H. Comparison of ABTS, DPPH, FRAP and ORAC assays for estimating antioxidant activity from guava fruit extracts. **Journal of Food Composition and Analysis**, v.19, p.669-675, 2006.
- [40] ZEDAYKO, T, AZRIEL, M. AND KOLLIAS, N. Caucasian facial L* shifts may communicate anti-aging efficacy. **Int. J. Cosmet. Sci.** 33, 450-454. 2011.

Capítulo 19

Sistema de irrigação automatizada com monitoramento em tempo real via IoT

Alexandre Magnus Fernandes Guimarães

Erick Custodio Vitória

Flávio José Nunes de Souza

Emanuel Lucas Nogueira da Silva

Pablo Matheus Duarte Silva

Resumo: Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema inteligente de irrigação e monitoramento baseado em Internet das Coisas (IoT), voltado para comunidades de baixa renda e a agricultura familiar. A proposta visa oferecer uma solução tecnológica acessível, capaz de otimizar o uso da água, reduzir desperdícios e promover a inclusão social por meio da automação de processos agrícolas. O sistema emprega uma variedade de sensores para monitorar continuamente as condições ambientais e garantir parâmetros ideais para o cultivo eficiente e sustentável de culturas. O protótipo funcional foi concluído e testado no Laboratório de Eletrotécnica da Escola de Ciências e Tecnologia (ECT) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), demonstrando estabilidade na coleta, transmissão e armazenamento dos dados agrícolas. Atualmente, o projeto encontra-se na fase de ajustes estruturais, com foco em aprimorar sua resistência para enfrentar as condições adversas da validação em campo. Essa etapa será realizada em parceria com o Laboratório Horta Comunitária Nutrir (LabNutrir - <https://nutrir.com.vc/blog/>), que mantém uma horta comunitária dentro da UFRN e contribuirá diretamente para a aplicação prática do sistema. Os resultados obtidos até o momento indicam que a solução é viável, escalável e altamente promissora para diferentes cenários agrícolas e comunidades em situação de vulnerabilidade.

Palavras-chave: Irrigação, agricultura familiar, sistemas embarcados, economia de água, comunicação à longas distâncias.

1. INTRODUÇÃO

A agricultura desempenha um papel essencial no desenvolvimento econômico e social, sendo responsável não apenas pela produção de alimentos, mas também pela geração de emprego, renda e bem-estar, especialmente em comunidades de baixa renda e em áreas rurais. Nessas regiões, a agricultura familiar e as hortas comunitárias assumem papel estratégico na promoção da segurança alimentar, da autonomia produtiva e da sustentabilidade social, contribuindo diretamente para a redução das desigualdades e para a valorização das economias locais. Entretanto, esses sistemas produtivos enfrentam desafios expressivos relacionados à gestão eficiente dos recursos naturais, em especial da água, cuja escassez e uso inadequado comprometem a produtividade, a rentabilidade e a sustentabilidade das pequenas propriedades rurais.

A irrigação constitui uma das práticas mais determinantes para o êxito da produção agrícola, influenciando diretamente o crescimento das plantas e a estabilidade da colheita. No entanto, em grande parte das pequenas propriedades, o manejo da irrigação ainda é realizado de forma manual, empírica e pouco precisa, o que resulta em desperdício de água, aumento dos custos operacionais e impactos ambientais negativos, como a erosão do solo e a lixiviação de nutrientes. Diante desse cenário, torna-se imprescindível o desenvolvimento de soluções tecnológicas acessíveis e eficientes que apoiem o produtor na tomada de decisão, promovendo o uso racional dos recursos hídricos e contribuindo para uma agricultura mais sustentável e resiliente.

O avanço das tecnologias digitais e, em particular, da Internet das Coisas (IoT – *Internet of Things*), tem aberto novas perspectivas para a modernização e automação agrícola, viabilizando a integração entre sensores, microcontroladores e sistemas de comunicação capazes de coletar, transmitir e analisar dados ambientais em tempo real. Essas soluções tecnológicas possibilitam o monitoramento contínuo das condições do solo e do ambiente, além da automação de processos agrícolas, como a irrigação, aumentando a eficiência produtiva e reduzindo o consumo de insumos e recursos naturais. Devido ao seu caráter modular, escalável e de baixo custo, as tecnologias baseadas em IoT configuram-se como uma alternativa viável para pequenos produtores rurais e comunidades vulneráveis, fomentando a inclusão digital e tecnológica no campo e fortalecendo práticas agrícolas sustentáveis.

Nesse contexto, o presente projeto apresenta o desenvolvimento de um protótipo de sistema de irrigação e monitoramento inteligente baseado em IoT, voltado à aplicação em hortas comunitárias e na agricultura familiar. O sistema proposto integra sensores de umidade do solo, incidência luminosa, crescimento vegetal, vazão e volume de água utilizado, conectados a plataforma microcontroladas Arduino e ESP8266, com transmissão de dados via rede LoRa e visualização em tempo real por meio de plataforma em nuvem. A proposta busca não apenas otimizar o uso da água e reduzir desperdícios, mas também capacitar comunidades locais para o uso de tecnologias digitais, fortalecendo a autonomia produtiva, a educação tecnológica e a sustentabilidade socioambiental.

2. METODOLOGIA

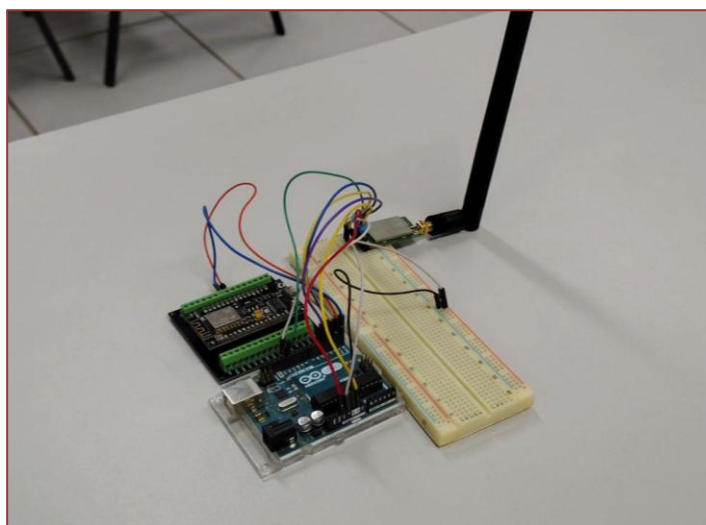
A metodologia adotada neste projeto tem como finalidade o desenvolvimento, implementação e validação de um sistema automatizado de monitoramento e controle da irrigação agrícola, com base em princípios de agricultura de precisão e tecnologias da Internet das Coisas (IoT). O sistema integra sensores ambientais, microcontroladores, comunicação sem fio por LoRa e visualização de dados em nuvem, possibilitando o acompanhamento contínuo das variáveis ambientais e o controle automatizado do fluxo de irrigação.

A pesquisa caracteriza-se como de natureza aplicada, com abordagem quantitativa e tecnológica, pois busca a aplicação de conhecimentos científicos e de engenharia na resolução de um problema real de manejo hídrico. O estudo será conduzido em ambiente real de cultivo, especificamente na Horta Comunitária do LabNutrir, situada na Universidade Federal do Rio Grande do Norte, o que confere ao projeto um caráter experimental e contextualizado à realidade da agricultura familiar e comunitária.

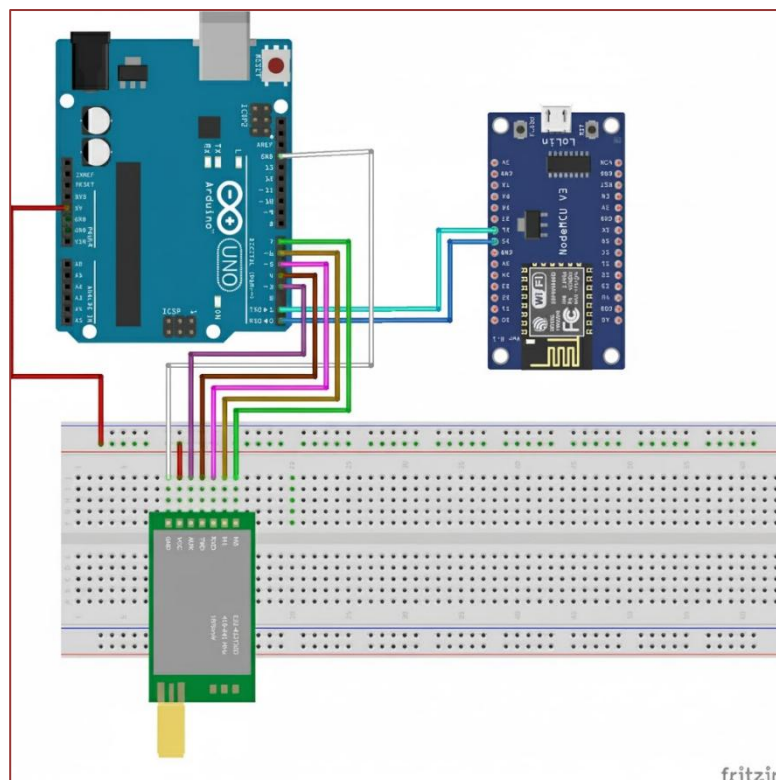
3. ESTRUTURA DO SISTEMA

A arquitetura do sistema proposto é composta por uma rede de dispositivos embarcados distribuídos no campo, responsáveis pela aquisição, processamento e transmissão de dados ambientais. O núcleo do sistema é constituído por uma plataforma Arduino, encarregada da leitura e pré-processamento dos dados provenientes dos sensores, e por um microcontrolador ESP8266, que atua como nó central receptor e transmissor das informações. Esse arranjo de comunicação pode ser visualizado na sua forma montada (Figura 01) e esquemática (Figura 02), que ilustram o circuito LoRa receptor dos dados.

Figura 01 - Circuito LoRa receptor dos dados.



Fonte: Autoria própria.

Figura 02 - Esquemática circuito LoRa receptor dos dados.

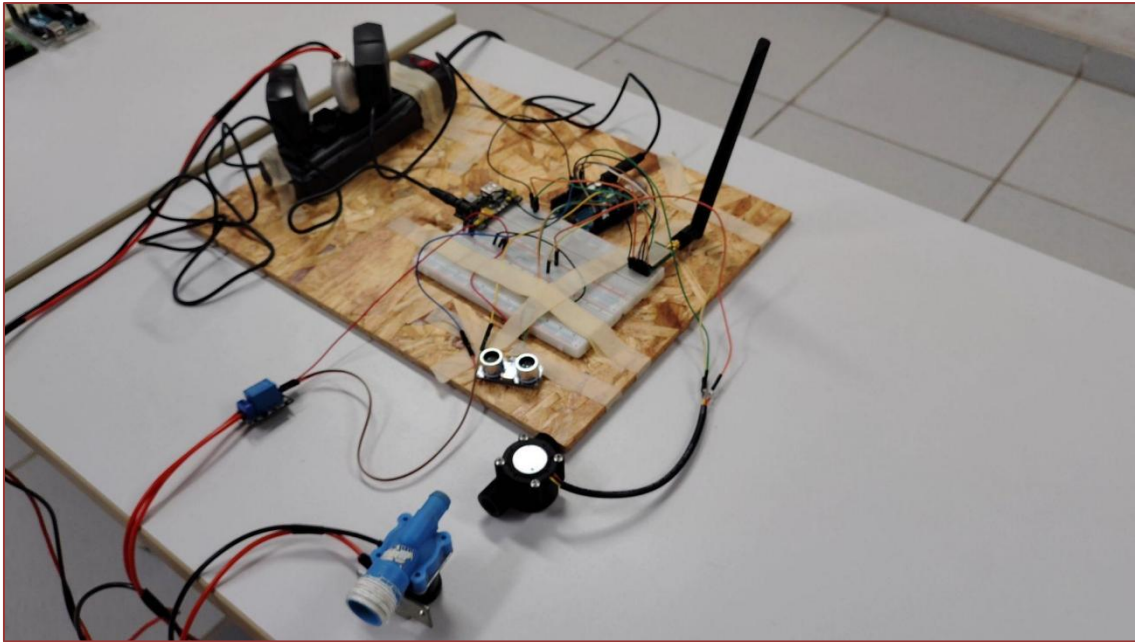
Fonte: Fritzing.

Os sensores empregados e suas respectivas funções são:

- Sensor de umidade do solo: mede o teor de água no solo, permitindo identificar o momento ideal para irrigação e prevenir o excesso de umidade;
- Sensor de Fluxo: quantifica o volume de água utilizado durante o processo de irrigação, permitindo calcular a eficiência hídrica e monitorar o consumo;
- Sensor ultrassônico: mensura o crescimento das plantas ao longo do tempo, possibilitando correlacionar esse parâmetro às condições de irrigação e ao volume de água aplicado;
- Sensor de luminosidade: embora ainda não esteja em uso na arquitetura atual, pretende-se incorporá-lo futuramente para monitorar a incidência luminosa, variável que influencia diretamente a evapotranspiração e, conseqüentemente, o consumo hídrico das culturas.

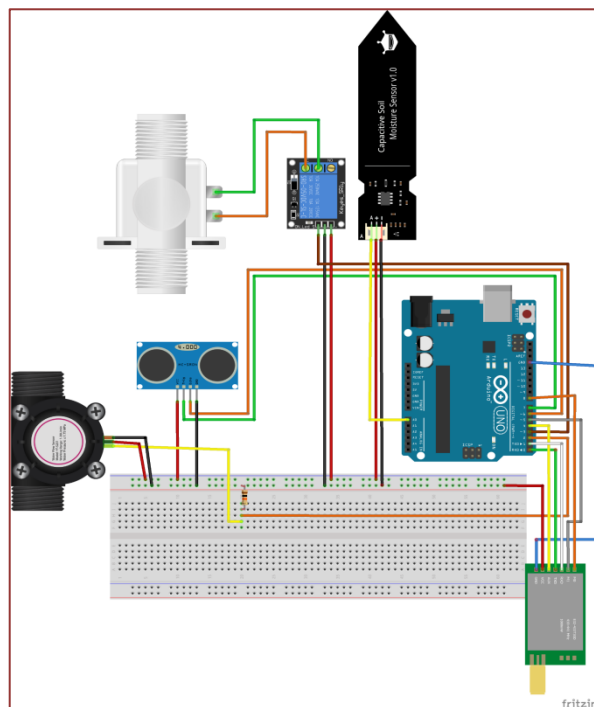
O protótipo com os sensores e atuadores conectados durante os testes iniciais pode ser visualizado na Figura 03, e seu diagrama esquemático correspondente é apresentado na Figura 04.

Figura 03 - Imagem do protótipo durante os primeiros testes.



Fonte: Autoria própria.

Figura 04 - Esquemática protótipo.



Fonte: Fritizing.

Os dados capturados pelos sensores são processados localmente pelo Arduino e enviados via LoRa para outro transceptor que estará conectado a um Arduino e ESP8266. O Arduino que recebe o sinal via LoRa transmite as informações por meio de comunicação UART

(*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*), utilizando os pinos TX (transmissão) e RX (recepção), para o ESP8266. Este, por sua vez, consolida os dados recebidos e os envia via Wi-Fi para uma plataforma de armazenamento e visualização em nuvem.

A Tabela 01 abaixo apresenta os valores referentes aos componentes utilizados.

Tabela 01 - Quantidades e valores dos componentes utilizados no projeto.

Componentes	Quantidade	Valor Unitário (R\$)
Arduino Uno R3	1	R\$ 46,90
Nodemcu Esp8266	1	R\$ 30,00
LoRa E32	2	R\$ 30,00
sensor capacitivo de umidade do solo	1	R\$ 20,00
sensor de distância ultrassônico HC-SR04	1	R\$ 15,00
sensor fluxo 1/2 - 30L/minuto	1	R\$ 35,00
válvula solenoide	1	R\$ 38,00
módulo relé 5V	1	R\$ 19,00
outros (protoboard, resistor e jumpers)	-	R\$ 16,30
Total	-	R\$ 280,20

Comunicação e visualização dos dados

A comunicação e a visualização dos dados são, até o presente momento, realizadas por meio da plataforma ThingSpeak, que oferece integração nativa com dispositivos IoT e permite o monitoramento remoto em tempo real. Os dados transmitidos são armazenados, tratados e exibidos em gráficos dinâmicos e painéis interativos, possibilitando a análise do comportamento das variáveis ambientais e a avaliação do desempenho do sistema de irrigação.

Como parte da evolução do projeto, está em desenvolvimento um sistema web próprio, destinado a ampliar a acessibilidade e o controle remoto da irrigação. Essa plataforma incluirá funcionalidades de acionamento manual de válvulas, notificações automáticas e geração de relatórios personalizados, oferecendo uma interface mais intuitiva e adaptada às necessidades de agricultores e gestores.

Automação e controle

O controle automatizado da irrigação é realizado por meio de uma válvula solenoide, acionada com base nos dados de umidade do solo. Quando o teor de água atinge valores inferiores ao limite pré-estabelecido, o sistema ativa automaticamente o fluxo hídrico, interrompendo-o assim que a umidade retorna ao intervalo ideal. Esse mecanismo de controle garante precisão na irrigação, minimiza o desperdício de água e favorece a sustentabilidade do manejo hídrico.

A análise dos dados coletados será direcionada à avaliação da eficiência hídrica do sistema, observando a correlação entre o crescimento das plantas (mensurado pelo sensor ultrassônico) e o volume de água utilizado (detectado pelo sensor de vazão). Essa relação permitirá quantificar o desempenho do sistema, identificar padrões de consumo e propor estratégias otimizadas de irrigação.

4. PERSPECTIVAS FUTURAS

Embora a versão atual do protótipo não incorpore módulos de inteligência artificial (IA), sua aplicação está prevista para etapas futuras do projeto. A integração de algoritmos de aprendizado de máquina (*machine learning*) permitirá aprimorar o processo de tomada de decisão automatizada, possibilitando previsões baseadas em dados históricos e variáveis climáticas. Dessa forma, o sistema poderá evoluir de uma automação reativa para uma gestão preditiva e inteligente da irrigação, contribuindo para um uso ainda mais racional e eficiente dos recursos hídricos.

Contexto experimental e relevância social

A escolha da Horta Comunitária do LabNutrir como ambiente experimental reforça o caráter prático, educacional e social do projeto. O local oferece condições reais de cultivo, o que permite avaliar o desempenho do sistema em um contexto representativo da agricultura familiar, onde a acessibilidade tecnológica e o uso eficiente da água são fatores essenciais para a sustentabilidade produtiva. O ambiente da horta onde serão realizados os testes futuros é apresentado na Figura 05.

Figura 05 - Labnutrir, ambiente dos futuros teste de campo UFRN.



Fonte: Autoria própria.

Espera-se que os resultados obtidos contribuam para a disseminação de práticas agrícolas mais sustentáveis, inteligentes e acessíveis, com potencial de replicação em outras

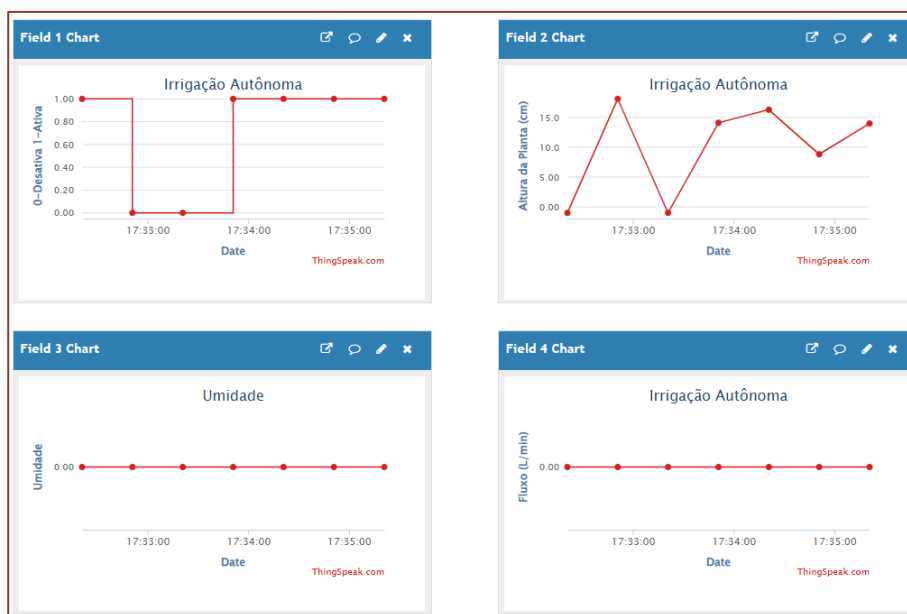
comunidades rurais. A integração entre sensores, microcontroladores, comunicação sem fio e plataformas digitais representa um avanço significativo na automação agrícola, oferecendo uma solução de baixo custo, escalável e socialmente inclusiva.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O desenvolvimento do projeto culminou na construção de um protótipo de sistema de irrigação e monitoramento inteligente totalmente funcional, que atendeu com sucesso aos objetivos estabelecidos para a fase inicial de implementação. Os testes conduzidos em ambiente de laboratório na UFRN, dentro do laboratório de Eletrotécnica da Escola de Ciências e Tecnologias, permitiram validar a arquitetura do sistema, a integração dos componentes de hardware e a estabilidade da comunicação de dados.

O principal resultado alcançado até o momento foi a comprovação da viabilidade técnica de um sistema de monitoramento agrícola de baixo custo, desenvolvido a partir de tecnologias acessíveis como Arduino, ESP8266 e LoRa. O protótipo demonstrou capacidade consistente de coleta de dados provenientes dos sensores de umidade do solo, fluxo de água e crescimento vegetal (ultrassônico). Essas informações foram transmitidas entre os Arduinos por meio da rede LoRa e, em seguida, encaminhadas via comunicação serial ao ESP8266, responsável por enviá-las, através de conexão Wi-Fi, à plataforma ThingSpeak. Nessa plataforma, foi possível visualizar os dados em tempo real por meio de gráficos dinâmicos, conforme ilustrado na Figura 06.

Figura 06 - Gráficos apresentados no ThingSpeak.



Fonte: Autoria própria.

A comunicação combinada entre os Arduinos (via LoRa) e o módulo ESP8266 (via Wi-Fi) apresentou desempenho robusto nos testes iniciais, com transmissão de dados estável e sem perdas significativas, validando sua adequação para aplicações em ambientes agrícolas adversos. Da mesma forma, o mecanismo de automação, controlado pela válvula

solenóide acionada de acordo com os limites de umidade do solo, funcionou conforme o esperado, realizando a irrigação de forma autônoma e precisa. Esses resultados indicam fortemente o potencial do sistema em otimizar o uso da água, evitando tanto o desperdício por irrigação excessiva quanto o estresse hídrico das plantas.

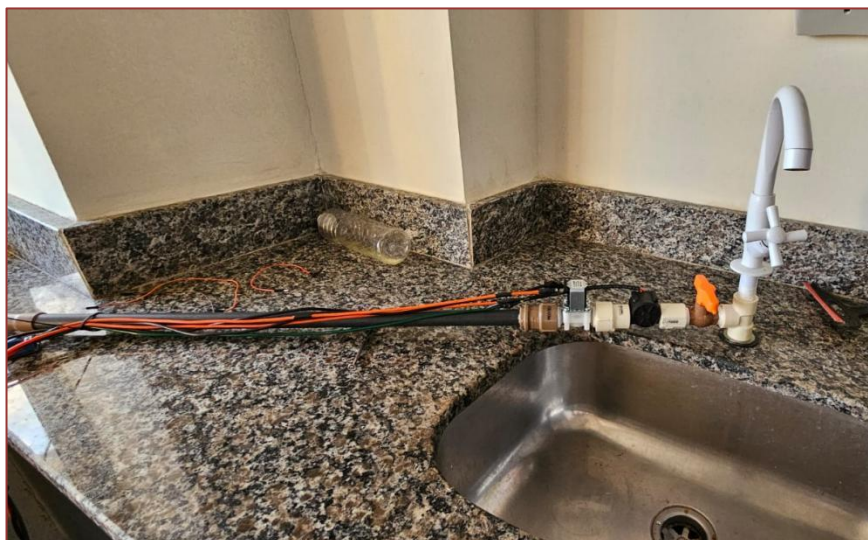
É importante ressaltar que os resultados atuais são provenientes de um ambiente controlado. Embora promissores, eles ainda não refletem o desempenho do sistema sob as condições adversas do campo, como variações climáticas intensas, exposição à poeira, umidade e a necessidade de maior autonomia energética, nesse contexto, a aplicação de uma inteligência artificial para análise desses dados dos sensores para tomada de decisões autônomas é crucial. A fase atual de ajustes estruturais visa justamente aprimorar a robustez e a resiliência do protótipo para mitigar esses desafios, preparando-o para a validação em um cenário real de cultivo. Antes dessa etapa, serão realizados testes no Laboratório de Eletrotécnica da Escola de Ciências e Tecnologia da UFRN acompanhando o crescimento de alguma planta. As Figuras 07 e 08 mostram o protótipo de horta utilizado nos testes e parte da instrumentação, respectivamente.

Figura 07 - Protótipo para teste em laboratório.



Fonte: Autoria própria.

A parceria com o LabNutrir será fundamental para a próxima etapa, pois permitirá avaliar não apenas a durabilidade e a eficiência do sistema, mas também sua usabilidade e aceitação pelos usuários finais. A análise correlacional entre o volume de água aplicado (medido pelo sensor de fluxo) e o crescimento das plantas (monitorado pelo sensor ultrassônico) fornecerá dados quantitativos sobre a eficácia da irrigação automatizada em comparação com métodos tradicionais.

Figura 08 - Instrumentação utilizada.

Fonte: Autoria própria.

Em suma, os resultados obtidos confirmam que a solução proposta é tecnicamente viável, escalável e promissora. A validação bem-sucedida do protótipo em laboratório constitui a base sólida para a transição para o ambiente de campo, aproximando o projeto de seu objetivo final: oferecer uma ferramenta tecnológica acessível e de alto impacto para a agricultura familiar e comunitária, alinhada aos princípios da sustentabilidade e da inclusão digital.

REFERÊNCIAS

- [1] NASCIMENTO, T. L. ; RODRIGUES, K. K. R. P. Agricultura 4.0: uso do ESP32 para a automatização de uma Horta Inteligente. In: XXXIII O Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica, 2022, Natal. Anais eCICT 2022 - Ciências da Vida, 2022., 2022.
- [2] SANTOS, A. P. S. ; NASCIMENTO, T. L. ; RODRIGUES, K. K. R. P. Uso da modelagem 3D para a elaboração de uma horta inteligente. In: XXXI Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica da UFRN - eCICT 2020, 2021, Natal. XXXI Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica da UFRN - eCICT 2020, 2021.
- [3] ABRANTES, K. K. J. Tecnologia social quintal produtivo - uma estratégia para o Desenvolvimento Rural Sustentável. Revista Econômica do Nordeste, n. 4, p. 61-77, 2015. ISSN 0100-49562357-9226.
- [4] AGROJETA. A importancia da irrigação para sua cultura. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <<https://www.agrojet.com.br/a-importancia-da-irrigacao-para-a-sua-cultura/>>. Acesso em: 24 mai. 2021.
- [5] BRITO, R. A. L.; ANDRADE, C.L. T. Métodos de Irrigação. [S.l.: s.n.], 2017. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/milho/arvore/CONTAG01_72_16820051120.html>. Acesso em: 23 jun. 2021.
- [6] BRUOF. Qual é a melhor hora do dia para regar as plantas?, 2018. Disponível em: <<https://irrigazine.wordpress.com/2018/08/20/qual-e-a-melhor-hora-do-dia-para-regar-as-plantas/>>. Acesso em: 25 mai. 2021.
- [7] ESTEVES, B. S. Irrigação por gotejamento. Programa Rio Rural, v. 1, n. 32, p. 18, 2012. ISSN 1983-5671.
- [8] MAXMAQ. Conheça a irrigação por gotejamento e dobre sua produtividade. [S.l.: s.n.], 2019. Disponível em: <<https://maxmaq.com.br/blog/irrigacao-por-gotejamento/>>.

- [9] REIS, J. S. Sistema de controle aplicado à automação de irrigação agrícola. F. 73. Monografia (Graduação) – UFTP. 2015.
- [10] SPIGOLON, R. A. Desenvolvimento de um sistema de monitoramento e irrigação automatizada para cultivo protegido. 2021. F. 44. Monografia (Graduação) – UNIPAMPA.
- [11] IoT analytics - ThingSpeak internet of things. Disponível em: <<https://thingspeak.mathworks.com/>>. Acesso em: 7 out. 2025.
- [12] IoT analytics - ThingSpeak internet of things. Disponível em: <<http://fritzing.org/>>. Fritzing: electronics made easy. Versão 1.0.5. Disponível em: <https://fritzing.org/>. Acesso em: 07 out. 2025.

Autores

ALINE MARA OLIVEIRA (ORGANIZADORA)

Possui graduação em Engenharia de Controle e Automação pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (2012). Pós Graduada em Gestão de Projetos (FGV 2014-5015). Ministrou aulas no Centro Universitário do Planalto de Araxá(2015-2016) e no CEFET-MG nos cursos de graduação e técnicos. Tem experiência na área de Automação Industrial, Engenharia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: redes industriais, proteção de sistemas elétricos, IEC-61850, automação, instrumentação, sistemas de controle, equacionamento de controladores, sistemas multivariáveis e teoria de controle. Trabalhou na indústria no setor de projetos industriais no período de 2007 a 2015. Mestre pela Universidade Federal de Uberlândia. (2017-2019). Atualmente doutoranda no curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.(2019-2023)

OSVALDO SENA GUIMARÃES (ORGANIZADOR)

Graduação em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia Kennedy (1983), Ênfase em Engenharia de Transportes EEK (1983), Análise De Sistemas - UFMG(1985), Especialização em Gestão de Projetos de Engenharia IEC/PUC (2012), Mestrado em Estratégia FEAD (2005). Professor do curso de Engenharia Civil da Universidade do Estado de Minas Gerais (2015-2017 Divinópolis). Professor na Faculdade Senac Minas. Atua na área de ensino superior desde 1988 como Professor, Coordenador de Curso, Coordenador de Extensão, Coordenador de Iniciação Científica e de Pré-incubadora de base Tecnológica. Atua na área de Engenharia, Computação e Projetos desde 1984.

AELSO ROCHA BRITO

Possui graduação em TECNOLOGIA EM GESTÃO EMPRESARIAL - Centro Paula Souza - FATEC, FATEC BRAGANÇA PAULISTA/SP (2019) e graduação em Engenharia da Computação pela Universidade São Francisco (2014). Tem experiência na área de Administração, com ênfase em Administração de Empresas

ALEXANDRE MAGNUS FERNANDES GUIMARÃES

Professor da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Graduado (1995 - UFRN), Mestre (1998 - UFRN) e Doutor (2009 - UFRN) em Engenharia Elétrica. Desenvolve pesquisas nas áreas de sistemas embarcados e energias renováveis.

ANNETTE SILVA FAESARELLA

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (1993), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (1995) e doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais pela Universidade de São Paulo (2001). Atualmente é professor convidado da Universidade São Francisco. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Materiais Elétricos, atuando principalmente nos seguintes temas: energias renováveis, proteção de sistemas elétricos de potência e veículos elétricos.

ANNUSKA VIEIRA CABRAL

Possui graduação em Engenharia de Alimentos pela Universidade Federal de Sergipe (2019). Mestra em Ciência e Tecnologia de Alimentos, pela Universidade Federal de Sergipe (2023).Doutorado em andamento em Biotecnologia (2024).

ANTONIO ALISSON ALENCAR FREITAS

Doutor e Mestre em Eletrônica de Potência aplicada a Fontes Renováveis de Energia pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Graduado em Engenharia Elétrica pela mesma instituição, com ênfase em Eletrotécnica e Eletrônica. Atua nas áreas de eletrônica de potência, sistemas embarcados, desenvolvimento de conversores CC/CC e CA/CC, integração de fontes renováveis de energia e eficiência energética, com ênfase em aplicações em nanorredes, produção de hidrogênio

verde e sistemas sustentáveis. Desenvolve pesquisas em agrovoltaica, voltadas à integração de sistemas fotovoltaicos com o setor agrícola, buscando soluções tecnológicas para o semiárido. Possui ainda experiência em Internet das Coisas (IoT) e criptografia aplicada, explorando segurança e conectividade em sistemas distribuídos, com aplicações em monitoramento remoto, automação e redes inteligentes. Atualmente, é Professor Adjunto da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), onde desenvolve atividades de ensino, pesquisa e orientação de trabalhos acadêmicos nas áreas de eletrônica de potência, fontes renováveis de energia, agrovoltaica e tecnologias emergentes.

ARTHUR ALVES GIANECCHINI

Mestrando em Ciências e Engenharia de Materiais - UTFPR

BRUNA ARAÚJO CANDIDO

Mestranda em Engenharia Civil - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - UFPE

CATIA FREDERICCI

Possui graduação em Química pela Universidade Federal de São Carlos (1986), mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais pela Universidade Federal de São Carlos (1992) e doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais pela Universidade Federal de São Carlos (1997). Finalizou em maio/2005 a coordenação de um projeto de Pesquisa Inovativa na Pequena e Micro Empresa (PIPE/FAPESP), junto à empresa VITROVITA - Instituto de Inovação em Vitrocerâmicos Ltda. Atualmente é pesquisadora do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, atuando no Laboratório de Processos Metalúrgicos do Centro de Tecnologia em Metalurgia e Materiais. Tem experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, com ênfase em Vidro e Cerâmica, atuando principalmente nos seguintes temas: vidro, síntese de pós, materiais odontológicos, materiais cerâmicos refratários. Atua em apoios tecnológicos junto às empresas realizando projetos de P&D&I e otimização de processos e produtos cerâmicos. Professora do Programa de Mestrado Profissional do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

DAVI CARLOS DE MENESES

Aluno do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, Bolsista do programa de iniciação a Docência (PID/UFC)

EMANUEL LUCAS NOGUEIRA DA SILVA

Profissional em início de carreira, formado em Eletrônica pelo IFRN e cursando C&T e Técnico em Informática para Internet na UFRN. Possui experiência com hardware, documentação técnica e projetos com microcontroladores (Arduino, ESP) em C++, além de atuar em desenvolvimento web (HTML, JavaScript) com foco em inovação.

ERICK CUSTODIO VITÓRIA

Graduando em Engenharia Mecânica pela UFRN. Possui curso Técnico integrado de Edificações pelo IFRN. Tem experiência com projetos de automação de sistemas embarcados.

FABIANO F. CHOTOLI

Possui graduação em Bacharel em Química Industrial e Biotecnologia pela Universidade de São Paulo (1998). Mestre em Habitação: Tecnologia em Construção de Edifícios. Realizou PDCE nas Universidade de Málaga e Universidade de Aveiro em 2012. Atualmente é pesquisador e está Gerente Técnico do Laboratório de Materiais para Produtos de Construção do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Tem experiência na área de Química de Materiais de Construção Civil, com ênfase em Química Analítica, qualidade laboratorial, produção de clínquer de

cimento Portland e aproveitamento de resíduos industriais para produção de aglomerantes alternativos. Também mantém progressivo aperfeiçoamento e conhecimento geral em Propriedade Intelectual, com foco em redação técnica de pedidos de patentes.

FABIO CEZAR FERREIRA

Possui pos doutorado pela Universidade Estadual Paulista (FCT-UNESP, de Presidente Prudente em 2004). Doutor em Físico-Química pela Escola de Engenharia de São Carlos - USP (2002, IQSC - USP). Mestrado em Físico-Química pela Escola de Engenharia de São Carlos - USP, (1998, IQSC - USP). Graduado em química (Bacharel e Licenciado) pela Universidade Estadual de Maringá - UEM (1995). Atualmente é professor Associado C4 na Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, professor no curso de especialização Engenharia de Segurança do Trabalho, Tem experiência na área de Polímeros Naturais e Condutores, Síntese de Polímero, Borracha Natural, Química da Madeira e Derivados.

FERNANDA LAYS OLIVEIRA DA SILVA RIBEIRO

Mestranda em Simulação Computacional e Modelagem Aplicada a Petróleo - Programa de Pós-graduação em Engenharia civil, UFPE

FLÁVIO JOSÉ NUNES DE SOUZA

Mestrando em Engenharia Mecatrônica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), graduando em Engenharia de Computação e bacharel em Ciência e Tecnologia pela mesma instituição. Possui experiência nas áreas de robótica, mecatrônica, automação e desenvolvimento web, com interesse em sistemas inteligentes e Internet das Coisas (IoT).

GUSTAVO DE OLIVEIRA WERNECK

Engenheiro Químico formado pela Universidade Federal de São João Del-Rei - Campus Alto Paraopeba. Trabalhou em projeto de Iniciação Científica na área de Tratamento de Efluentes Contaminados por Fármacos e Corantes Têxtil e Biocombustível. Possui Conhecimentos em Design of Experiments, softwares de edição de artes como CorelDraw e Photoshop, softwares matemáticos como Matlab, Minitab e OringinPro.

HELLOISE ROSENE

Graduanda em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica de São Paulo (PUC-SP), com formação prevista para 2026. Atua em pesquisas de Iniciação Científica sobre Indústria 4.0 e Robótica aplicada à Construção Civil, com foco em eficiência, sustentabilidade e inovação tecnológica. Possui experiência em estágios na Saint Gobain (produção e indicadores de performance), na TECNISA (acompanhamento de obras prediais) e na Secretaria Municipal de Infraestrutura Urbana e Obras – SIURB (gestão de obras públicas emergenciais). Tem domínio em ferramentas como Power BI, AutoCAD, Revit, TQS, MS Project e metodologias WCM, além de vivência internacional em intercâmbios na Romênia e Argentina.

IRANILZA COSTA DA SILVA

Doutoranda em Engenharia Civil - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - UFPE

JOÃO PEDRO SOUZA ANDRADE

Mestrando em Engenharia Civil - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - UFPE

JORGE DAVID ALGUIAR BELLIDO

Possui graduação em Engenharia Química - Universidad Nacional de Ingenieria (1999), mestrado em Química (Química Analítica) pela Universidade de São Paulo (2004), doutorado em Ciências, área de concentração em Química (Físico Química) pelo Instituto de Química de São Carlos/Universidade de São Paulo (2008), Com estudos de pos-doutorando na Universidade de São Paulo. Atualmente é Professor adjunto do curso de Engenharia Química no campus Alto Paraopeba da Universidade Federal de São João del-Rei, Minas Gerais. Tem experiência na área de Química, com ênfase em catálise Heterogênea, atuando principalmente nos seguintes temas: produção de hidrogênio, reforma a vapor e oxidativa de etanol, preparação de catalisadores, caracterização de catalisadores através de Redução a Temperatura Programada, Difração de Raios-X pelo método do Pó, Espectroscopia de Absorção na região do ultravioleta e do visível.

KAREN NICCOLI RAMIREZ

Pós-Doutora, doutora e mestre pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Engenheira civil e de produção pela Universidade Presbiteriana Mackenzie. Professora do curso de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica de São Paulo e do curso de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

LEANDRO AUGUSTO

Possui Mestrado em Habitação: Planejamento e Tecnologia pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (2013). Atualmente é assistente de pesquisa do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. e professor da Universidade Anhembí Morumbi.

LEONARDO MELO BEZERRA

Professor Associado 3 da Universidade Federal do Ceará

LISBETH ZELAYARAN MELGAR

Professora do curso de Engenharia Química da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ). Tem experiência em Desenvolvimento de processo químicos, processos de intercalação de materiais lamelares com compostos orgânicos e adsorção em leito fixo, processos eletroquímicos, eletrooxidação e eletrocoagulação para tratamento de efluentes. Estão sendo estudados a capacidade de adsorção dos argilominerais modificados para adsorção de corantes e fármacos em batelada e fluxo contínuo. Estudo da avaliação econômica de pre-projetos de processos químicos, visando propor vários cenários que melhorem a eficiência do processo e lucratividade.

MARCOS VINÍCIUS LOPES PEREIRA

Possui graduação em Engenharia de Controle e Automação (2003), mestrado em Engenharia Elétrica (2006) e doutorado em Administração (2020), todas essas obtidas na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Atualmente é professor adjunto Universidade Federal de São João Del-Rei (UFSJ), Campus Alto Paraopeba, atuando, principalmente, nos cursos de Engenharia Mecatrônica e Engenharia de Telecomunicações. Tem experiência na área de Engenharia de Controle e Automação, e possui os seguintes áreas de interesse: controle de processos industriais, processamento de sinais, identificação de sistemas dinâmicos, otimização de sistemas e inteligência computacional (redes neurais e sistemas nebulosos).

MARIANA SILVA NASCIMENTO

Mestrando em Engenharia Civil - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental - UFCG

MARÍLIA GABRIELA ALVES DE ARRUDA

Mestranda em Engenharia Civil - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - UFPE

MARILIA S. MENOSSI MORTARI

Engenheira de Materiais (UFABC), Bacharela em Ciência e Tecnologia (UFABC) e Doutora em Engenharia Metalúrgica e de Materiais (POLI-USP). Pesquisadora no Laboratório de Processos Químicos e Tecnologia de Partículas do BIONANO no Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Trabalha com Pesquisa e Desenvolvimento de novos produtos e processos na área da engenharia de materiais e engenharia química. Tem experiência em síntese e caracterização de materiais e nanomateriais (foco em polímeros) e em processos de polimerização e esterificação. Os projetos nos quais atua englobam: síntese e caracterização de poliacrilatos e monômeros de cura por UV, síntese e caracterização de nanopartículas poliméricas condutoras e caracterização de nanocompósitos de matrizes poliméricas com aplicação em revestimentos contra corrosão. Trabalhou com armazenamento de dados em DNA (DNA data storage) como tecnologia/alternativa inovadora para cold storage, fazendo parte do único grupo de pesquisa brasileiro que atua na área. Atualmente trabalha com processos de manufatura de sensores flexíveis de umidade baseado em tecnologia de bateria aquosa.

MÁRIO CUPERTINO DA SILVA JÚNIOR

Possui graduação em Engenharia de Controle e Automação pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (2004), mestrado e doutorado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (2006 e 2010), com estágio de doutoramento na Universidade de Valladolid, em Valladolid, Espanha (2008-2009). Atualmente é professor Associado na Universidade Federal de Sergipe. Tem experiência e interesse em Automação Agrícola, atuando principalmente nos seguintes temas: Processamento Digital de Imagens, Agricultura de Precisão, Visão Computacional e Automação de Processos Agrícolas.

MICHEL CARLO RODRIGUES LELES

Professor Associado da Universidade Federal de São João del-Rei, Campus Alto Paraopeba, em que está lotado no Departamento de Tecnologia (DTECH/CAP/UFSJ). Engenheiro de Controle e Automação pela Universidade Federal de Minas Gerais. Possui Mestrado e Doutorado em Engenharia Elétrica pela mesma instituição. Docente nos Programas de Pós Graduação em: i) Ciência da Computação (PPGCC/UFSJ); e ii) Pesquisa Operacional (PPGPO/ITA-UNIFESP). Tem interesse na grande área de Data Science, especialmente na análise de séries temporais, processamento de linguagem natural, e finanças computacionais.

NILO ANTONIO DE SOUZA SAMPAIO

Possui graduação em Engenharia Química pela Escola de Engenharia de Lorena EEL-USP (1994), mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade de Taubaté UNITAU (2005), doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho UNESP (2011). Atualmente é Professor Associado da Universidade do Estado do Rio de Janeiro atuando na graduação dos cursos de Engenharia, no Mestrado em Engenharia Ambiental (PEAMB) e no Doutorado em Engenharia Ambiental (DEAMB). Tem experiência na área de Matemática e Estatística, com ênfase em Aplicações da Estatística e da Matemática em Ciências, Modelamento Matemático, Otimização e Planejamento de Experimentos, Estatística Multivariada, Monitoramento de Processos e Inteligência Artificial.

PABLO MATHEUS DUARTE SILVA

Graduando em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Tem experiência na área de desenvolvimento backend com C#, Python, Django, PostgreSQL, Docker e monitoramento de servidores com Zabbix e Grafana.

RAFAEL LUZ ESPINDOLA

Professor Adjunto do Departamento de Engenharia e Tecnologia do Centro de Engenharias da Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA, atua nos cursos de Engenharia Mecânica e

Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia desde 2013. Graduado em engenharia mecânica pela UFPE, possui mestrado e doutorado também pela UFPE em engenharia mecânica, sendo o primeiro com ênfase em engenharia naval e oceânica e o segundo com ênfase em energia. Desenvolve pesquisas na área de energias renováveis, principalmente eólica e oceânicas.

RAFAEL MISAEL VEDOVATTE

Doutorado em andamento em Engenharia Mecânica e de Materiais, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR. Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais, Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho e Graduado em Engenharia de Materiais pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Atuando principalmente nas seguintes áreas: fabricação de filmes finos para dispositivos fotovoltaicos, cerâmicas porosas para sistemas bifásicos de troca de calor e biomateriais. Atua como Docente da Kroton Educacional, na Universidade Pitágoras UNOPAR de Londrina/PR, e na Anhanguera Educacional, ambas nas modalidades Ensino à Distância e presencial.

RENATA LIMA MORETTO

Graduada pela Faculdade de Engenharia Ambiental (2010) da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Mestre em Engenharia Civil (2012) pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul na área de Meio Ambiente e Doutora em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas na área de Saneamento e Ambiente (2018). Minhas experiências profissionais foram de estagiária na EExMM (Instituto Florestal - SMA) até janeiro de 2010, na Embrapa Agroenergia (final de 2008) e experiência também na TBG - Transportadora Brasileira Gasoduto Bolívia - Brasil S.A (2008). Participei da Iniciação Científica com o tema Nanotecnologia e detecção de cianotoxinas: aplicações do método imunológico em microscopia de força atômica, tendo como orientador o Prof. Dr. Augusto Etchegaray Junior.

TALISSON LINS ROCHA

Mestrando em Engenharia Civil - Programa de Pós-graduação em Engenharia civil, UFPE

TALLYS CELSO MINEIRO

Doutorando em Engenharia Civil - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - UFPE

WEDSON LUIS DOS REIS DANTAS

Doutorando em Engenharia Civil - Programa de Pós-graduação em Engenharia civil, UFPE

WILLIAM MOURA OLIVEIRA

Engenheiro Mecatrônico pela Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ). Foi monitor nas disciplinas de Projeto e Computação Gráfica e Visão Computacional, além de integrar a equipe de competição NoizAvua Aerodesign, atuando como gerente de projeto. Desenvolveu pesquisa de iniciação científica em técnicas de visão computacional para detecção de corantes em efluentes têxteis, trabalho premiado com Menção Honrosa no XXVI Seminário de Iniciação Científica e Acadêmica da UFSJ.

www.poisson.com.br
contato@poisson.com.br

@editorapoisson



<https://www.facebook.com/editorapoisson>

