HENRIQUE AJUZ HOLZMANN
GÉSSICA KATALYNE BILCATI
(ORGANIZADORES)

ENGENHARIAS:

DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS E PRODUTOS

3

Atena Editora
Ano 2023

HENRIQUE AJUZ HOLZMANN
GÉSSICA KATALYNE BILCATI
(ORGANIZADORES)

ENGENHARIAS:

DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS E PRODUTOS

3

Atena Editora
Ano 2023

CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA E ENGENHARIAS

Editora chefe
Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira
Editora executiva
Natalia Oliveira
Assistente editorial
Flávia Roberta Barão
Bibliotecária
Janaina Ramos
Projeto gráfico
Camila Alves de Cremo
Ellen Andressa Kubisty
Luiza Alves Batista
Nataly Evilin Gayde
Imagens da capa
iStock
Edição de arte
Luiza Alves Batista

2023 *by Atena Editora*
Copyright © Atena Editora
Copyright do texto © 2023 Os autores
Copyright da edição © 2023 Atena Editora
Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.
Open access publication by Atena Editora

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

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

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

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

Conselho Editorial
Ciências Exatas e da Terra e Engenharias
Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre
Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie
Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Drª Glécilla Colombelli de Souza Nunes – Universidade Estadual de Maringá
Profª Drª Iara Margolis Ribeiro – Universidade Federal de Pernambuco
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Profª Drª Maria José de Holanda Leite – Universidade Federal de Alagoas
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Prof. Dr. Milson dos Santos Barbosa – Universidade Tiradentes
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Prof. Dr. Nilzo Ivo Ladwig – Universidade do Extremo Sul Catarinense
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Profª Dr Ramiro Picoli Nippes – Universidade Estadual de Maringá
Profª Drª Regina Célia da Silva Barros Allil – Universidade Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA E ENGENHARIAS

Engenharias: desenvolvimento de processos e produtos 3

Diagramação: Luiza Alves Batista
Correção: Maiara Ferreira
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizadores: Henrique Ajuz Holzmann
Géssica Katalyne Bilcati

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E57 Engenharias: desenvolvimento de processos e produtos 3 / Organizadores Henrique Ajuz Holzmann, Géssica Katalyne Bilcati. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2023.

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-258-1538-1
DOI: https://doi.org/10.22533/at.ed.381230308

1. Engenharia. I. Holzmann, Henrique Ajuz (Organizador). II. Bilcati, Géssica Katalyne (Organizadora). III. Título.

CDD 620

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

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

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

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

DECLARAÇÃO DA EDITORA

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

APRESENTAÇÃO

Um dos grandes desafios enfrentados atualmente nos mais diversos ramos do conhecimento, é o do saber multidisciplinar, aliando conceitos de diversas áreas. Hoje exige-se que os profissionais saibam transitar entres os conceitos e práticas, tendo um viés humano e técnico.

Neste cenário destaca-se as engenharias, as quais são um dos principais pilares para o setor empresarial. Analisar os campos de atuação, bem como pontos de inserção e melhoria é de grande importância, buscando desenvolver novos métodos e ferramentas para melhoria contínua de processos.

Estudar temas relacionados a engenharia é de grande importância, pois desta maneira pode-se aprimorar os conceitos e aplicar os mesmos de maneira mais eficaz.

O aumento no interesse se dá principalmente pela escassez de matérias primas, a necessidade de novos materiais que possuam melhores características físicas e químicas e a necessidade de reaproveitamento dos resíduos em geral. Além disso a busca pela otimização no desenvolvimento de projetos, leva cada vez mais a simulação de processos, buscando uma redução de custos e de tempo.

De abordagem objetiva, a obra se mostra de grande relevância para graduandos, alunos de pós-graduação, docentes e profissionais, apresentando temáticas e metodologias diversificadas, em situações reais.

Boa leitura

Henrique Ajuz Holzmann
Géssica Katalyne Bilcati

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 1

VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DO PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA PARA A FABRICAÇÃO DE UMA PEÇA DE AÇO INOXIDÁVEL EM UM LABORATÓRIO DE PESQUISA EM RADIOLOGIA INDUSTRIAL

André da Silva Barbosa
Maria Iaponeide Fernandes Macêdo
Paula de Castro Brasil
Neyda de la Caridad Om Tapanes
Roberta Gaidzinski
Gisele Duarte Caboclo Antolin
Tatiana Santos da Cunha
Tetyana Gurova

https://doi.org/10.22533/at.ed.3812303081

CAPÍTULO 2 17

ESTUDO DOS MECANISMOS DE CORROSÃO EM JUNTAS SOLDADAS POR PROCESSOS MIG CONVENCIONAL E MIG PULSADO DE UMA LIGA DE ALUMÍNIO DA SÉRIE 5XXX

Emmanuelle Sá Freitas
Maria Adrina Paixão de Souza da Silva
Orivam Souza Lalor
Diego Gomes dos Santos
Ana Paula Silva Santos

https://doi.org/10.22533/at.ed.3812303082

CAPÍTULO 3 30

PROJETO DE UMA BANCADA DE TESTES COM DINAMÔMETRO DE INERCIA

Luís Henrique Martins de Medeiros
Rogério Pontes de Araújo

https://doi.org/10.22533/at.ed.3812303083

CAPÍTULO 4 33

SISTEMAS PERIÓDICOS: A EXTENSÃO DO PRINCÍPIO DE INVARIÂNCIA

Wendhel Raffa Coimbra
Luís Fernando Alberto Costa
Fabíolo Moraes Amaral

https://doi.org/10.22533/at.ed.3812303084

CAPÍTULO 5 48

TÉCNICAS DA ÁREA DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL, COM INTELIGENCIA ARTIFICIAL, EM ESPECIAL CHATGPT UTILIZADAS COMO FERRAMENTA DE APOIO NO ENSINO UNIVERSITÁRIO NA DISCIPLINA DE ROBÓTICA

Márcio Mendonça
Matheus Gil Bovolenta
Francisco de Assis Scannavino Junior
Lucas Botoni de Souza
Gustavo Henrique Bazan

Marcos Antônio de Matos Laia
Renato Augusto Pereira Lima
Bruno Oliveira Rosa
Luiz Francisco Sanches Buzachero
Rodrigo Rodrigues Sumar
Vera Adriana Huang Azevedo Hypólito
João Maurício Hypólito
Fabio Nogueira de Queiroz
Henrique Cavalieri Agonilha
Emanuel Ignacio Garcia

https://doi.org/10.22533/at.ed.3812303085

CAPÍTULO 6 61

A IMPRESSÃO 3D NA PROTOTIPAGEM RÁPIDA DE PRODUTOS INDUSTRIAIS

Artur Oliveira Santos
João Domingos Covello Carregosa

https://doi.org/10.22533/at.ed.3812303086

CAPÍTULO 7 74

ANÁLISE DE RESISTÊNCIA A FLEXÃO DE COMPÓSITOS COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DE COBRE E FIBRAS ALCALINAS DE BAMBU

Alessandro José Gomes dos Santos
Rian Cristian Douro Amorim
Deibson Silva da Costa
Emerson Cardoso Rodrigues
Diego Cardoso Estumano
José Antônio da Silva Souza

https://doi.org/10.22533/at.ed.3812303087

CAPÍTULO 8 81

APPLICATION OF PERESKIA ACULEATA MILL. LEAVES POWDER FOR REMOVAL OF CD(II) AND PB(II) FROM MONO- AND BICOMPONENT SYSTEMS

Josiane Lopes de Oliveira
Emylle Emediato Santos
Liliane Catone Soares
Roberta Eliane Santos Froes

https://doi.org/10.22533/at.ed.3812303088

CAPÍTULO 9 102

SÍNTESE DE MATERIAIS ADSORVENTES A PARTIR DE CAULIM

Rian Cristian Douro Amorim
Antônio Lucas Alcantara Modesto
Alex Gabriel Oliveira Ruivo
Mailson Batista de Vilhena
Dilson Nazareno Pereira Cardoso

Josiel Lobato Ferreira
Bruno Marques Viegas
Deibson Silva da Costa
José Antônio Silva da Souza
Emanuel Negrão Macêdo
Diego Cardoso Estumano
Emerson Cardoso Rodrigues

https://doi.org/10.22533/at.ed.3812303089

CAPÍTULO 10 111

ESTUDO DA ESTABILIDADE DO EXTRATO DE FOLHAS DE CRAJIRU (*ARRABIDAEA CHICA*) E APLICAÇÃO NO TINGIMENTO DE TECIDOS DE ALGODÃO CATIONIZADOS

Julie Hangai
Alexandre Jose Sousa Ferreira
Nívea Taís Vila
Simone Fiori
Márcia Gomes da Silva

https://doi.org/10.22533/at.ed.38123030810

CAPÍTULO 11 116

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E NOVAS TECNOLOGIAS PARA A INDUSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Everton Augusto Gonçalves
Andréa Teresa Riccio Barbosa

https://doi.org/10.22533/at.ed.38123030811

CAPÍTULO 12 127

ENERGIA SOLAR: GERAÇÃO DISTRIBUIDA FOTOVOLTAICA - SUA IMPORTANCIA PARA O BRASIL

Milton Luis Filipe Muhongo
Joel João dos Santos Mazumbua

https://doi.org/10.22533/at.ed.38123030812

CAPÍTULO 13 140

MODELOS ESTOCÁSTICOS DE PREVISÃO DE UMIDADE RELATIVA DO AR PARA BOA VISTA-RR

Alanderson Firmino de Lucas
Matheus Henrique Bezerra de Melo
Daniel Felipe da Silva
Thiago Gonçalves da Silva
Albert Smith Feitosa Suassuna Martins
Everton Felipe de Souza Pinheiro
Bárbara Araujo Silva
Paula Andressa Alves de Araújo
José Augusto Ferreira Neto
Israel Walter Hilário da Silva

https://doi.org/10.22533/at.ed.38123030813

SOBRE OS ORGANIZADORES **153**

ÍNDICE REMISSIVO **154**

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

VIABILIDADE DE IMPLANTAÇÃO DO PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA PARA A FABRICAÇÃO DE UMA PEÇA DE AÇO INOXIDÁVEL EM UM LABORATÓRIO DE PESQUISA EM RADIOLOGIA INDUSTRIAL

Data de submissão: 21/05/2023 *Data de aceite: 03/07/2023*

André da Silva Barbosa
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias (FCEE)
Rio de Janeiro – RJ
https://orcid.org/0009-0001-2491-8778

Maria Iaponeide Fernandes Macêdo
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias (FCEE)
Rio de Janeiro – RJ
https://orcid.org/0000-0001-7928-8040

Paula de Castro Brasil
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias (FCEE)
Rio de Janeiro – RJ
http://lattes.cnpq.br/1387556808330533

Neyda de la Caridad Om Tapanes
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias (FCEE)
Rio de Janeiro – RJ
https://orcid.org/0000-0002-9818-3655

Roberta Gaidzinski
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias (FCEE)
Rio de Janeiro – RJ
https://orcid.org/0000-0001-5144-4259

Gisele Duarte Caboclo Antolin
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias (FCEE)
Rio de Janeiro – RJ
http://lattes.cnpq.br/0318467707969652

Tatiana Santos da Cunha
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias (FCEE)
Rio de Janeiro – RJ
http://lattes.cnpq.br/1206792034001854

Tetyana Gurova
Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias (FCEE)
Rio de Janeiro – RJ
http://lattes.cnpq.br/8505053140543339

RESUMO: A Manufatura Aditiva é uma tecnologia baseada no conceito da indústria 4.0 que tem se destacado no cenário industrial devida a inúmeras vantagens apresentadas no intuito de redução de tempo e de custos de produção. A proposta deste trabalho é avaliar o processo de fabricação por manufatura aditiva, para isto foi utilizado uma peça de teste com orifícios vazantes e extremidades rosqueáveis a fim de explorar as possibilidades de falhas na produção. Sabe-se também que no cenário industrial os ensaios não destrutivos são denominados como verdadeiras ferramentas que permitem garantir a manutenção da qualidade do processo produtivo, baseado neste contexto foi utilizado a tomografia industrial como técnica de ensaio não destrutivo para avaliar a integridade do interior de duas peças, uma confeccionada por manufatura aditiva de aço inoxidável 316 e a outra peça feita por fundição. Os resultados demostraram que o processo de produção por manufatura aditiva (MA) possuía melhor qualidade estrutural quando comparado ao processo por fundição. Diferente da peça fabricada por MA, a peça confeccionada por fundição apresentou inúmeras porosidades de tamanho acentuado além de ter sido constatado pontos de falta de fusão no interior da estrutura. Estas falhas podem comprometer a qualidade estrutural da amostra ocasionando na perda de funcionalidade. Por meio da entrevista, foi possível destacar os principais benefícios da aplicação da tecnologia de manufatura aditiva no sistema da empresa em questão. Conclui-se que a manufatura aditiva possui inúmeras vantagens que agregam ao potencial competitivo empresarial, permitindo a redução de etapas do processo de produção, baixa intervenção humana e menor uso de matéria-prima. No entanto é importante considerar o custo elevado de aquisição do equipamento que pode ser um fator impeditivo para implantação desta tecnologia em empresas de pequeno porte. Os resultados demostraram que o processo de produção por manufatura aditiva possuía melhor qualidade estrutural quando comparado ao processo por fundição.
PALAVRAS-CHAVE: Manufatura Aditiva; Ensaio Não-Destrutivo; Tomografia Computadorizada; Processo de Fabricação.

FEASIBILITY OF IMPLEMENTING THE ADDITIVE MANUFACTURING PROCESS TO FABRICATION OF A STAINLESS STEEL PART IN AN INDUSTRIAL RADIOLOGY RESEARCH LABORATORY

ABSTRACT: Additive Manufacturing is a technology based on the concept of industry 4.0 that has stood out in the industrial scenario due to the numerous advantages presented in order to reduce time and production costs. The purpose of this work is to evaluate the manufacturing process by additive manufacturing, for this purpose a test piece with leaking holes and threaded ends was used in order to explore the possibilities of production failures. It is also known that in the industrial scenario, non-destructive tests are called true tools that guarantee the maintenance of the quality of the production process, based on this context, industrial tomography was used as a non-destructive test technique to evaluate the integrity of the interior of two parts, one made by additive manufacturing of 316 stainless steel and the other made by casting. The results showed that the additive manufacturing (AM) production process had better structural quality when compared to the casting process. Unlike the piece manufactured by MA, the piece made by casting showed numerous porosities of high size, in addition to having points of lack of fusion found inside the structure. These flaws can

compromise the structural quality of the sample, causing loss of functionality. Through the interview, it was possible to highlight the main benefits of applying additive manufacturing technology in the company's system in question. It is concluded that additive manufacturing has numerous advantages that add to the business competitive potential, allowing the reduction of steps in the production process, low human intervention and less use of raw materials. However, it is important to consider the high cost of acquiring the equipment, which can be an impediment to the implementation of this technology in small companies.
KEYWORDS: Additive Manufacturing; Non-Destructive Tests; Industrial Tomography; Manufacturing Process.

1 I INTRODUÇÃO

Ao longo de toda evolução do sistema de produção, a tecnologia sempre foi o alicerce para a modernização dos processos e sistemas de fabricação, o que favoreceu a redução de custos e o tempo de produção, sem afetar a qualidade do produto. Isto porque a vantagem principal do uso da tecnologia se dá pela possibilidade de monitoramento em tempo real dos processos, tornando os ajustes mais rápidos e, por consequência, verificações de qualidade mais precisa. Segundo Raposo (2021), o modo com que a inovação tecnológica impacta na competitividade das organizações se dá por intermédio da otimização da produtividade, da melhoria na comunicação, na qualidade dos produtos, bem como nos métodos de controle e planejamento, possibilitando, consequentemente, a diferenciação ou a redução dos custos.

Assim, para se obter boa competitividade, os líderes de grandes organizações precisam considerar tudo o que pode afetar uma mudança do cenário na empresa. Então, há a necessidade de uma postura inovadora, com atenção às tendências e ser capaz de se ajustar a elas. Logo, as empresas que conseguirem ser capazes de inovar, de se anteciparem às mudanças e de se adequarem às mesmas tornam-se mais competitivas frente às outras.

O autor Netto (2016) define processo industrial como sendo uma sequência contínua de fatos ou fenômenos que se reproduzem com certa regularidade dentro das indústrias para produção de produtos ou matérias-primas para outras indústrias. Diferentemente, um processo de manufatura é definido pelo autor como sendo a forma como a indústria irá manipular uma determinada matéria-prima para se obter um produto acabado. Já o processo de produção é definido como um conjunto de atividades que objetiva o desenvolvimento de um produto ou serviço.

Diretamente relacionado com o conceito de manufatura tem-se os processos de fabricações que consistem, basicamente, num conjunto de técnicas que, geralmente, envolvem fenômenos físicos, tais como: fusão, solidificação, remoção de material, moldagem entre outras formas que são aplicadas para a transformação da matéria-prima em um produto acabado. Neste capitulo, portanto, o foco será na Manufatura Aditiva (MA).

A MA consiste, basicamente, de um tipo de processo de fabricação que utiliza um modelo digital, geralmente em CAD, e que a partir deste constrói um objeto tridimensional. É denominada “aditiva” devido ao fato de o processo ser realizado em finas camadas de materiais, uma sobre a outra.

As principais vantagens adquiridas com o emprego desta técnica quando comparado com outras, são: Redução dos custos com equipamentos e ferramentas; consolidação de várias peças; agilidade na produção; customização e sustentabilidade.

Logo, suas características contribuíram para uma ampla difusão desta técnica no setor industrial. Isto porque além da possibilidade de construção de uma peça complexa, de forma ágil e customizada, ou seja, com características que o cliente deseja, a técnica possui uma facilidade de automatização pois torna o processo de produção mais enxuto e dispensa a utilização de diversos equipamentos.

Sabendo disso, tornou-se necessário a implementação da técnica de ensaio não destrutivo para inspeção da confiabilidade estrutural do produto após a confecção por MA. Segundo a explicação de Júnior (2006), Ensaios Não Destrutivos (END) consistem em técnicas utilizadas para a inspeção de materiais e equipamentos sem danificá-los e são definidos como testes para o controle da qualidade, realizados sobre peças acabadas ou semiacabadas, para a detecção de defeitos ou falta de homogeneidade, através de princípios físicos definidos, sem prejudicar a posterior utilização dos produtos inspecionados.

Dessa forma, foi escolhida a técnica de Tomografia Computadorizada Industrial (TC) que possibilita o acesso não destrutivo ao interior de peças complexas constituídas por diversos tipos de materiais, poliméricos, metálicos, biológicos entre outros. Isso é possível pois a técnica utiliza softwares sofisticados que possibilitam realizar comparações da amostra digitalizada com o modelo matemático CAD (*Computer Aided Design*). Permitindo identificar desvios da amostra fabricada em relação ao projeto original da engenharia, além de comparar peças produzidas em momentos diferentes no decorrer da vida útil de um equipamento para uma melhor avaliação de seu desgaste.

Por isso, a análise por tomografia computadorizada tem obtido cada vez mais destaque no setor industrial por consistir numa técnica de inspeção que permite coletar grandes quantidades de dados da geometria tanto interna quanto externa da peça a ser analisada. Sendo que essas informações possibilitam a identificação de defeitos que podem ser relacionados com a causa raiz de algum tipo de falha funcional que o produto possui ou ainda pode adquirir com o decorrer do tempo.

Um típico exemplo de defeito é a porosidade, que compromete indevidamente a resistência dos componentes e, portanto, deve ser perfeitamente controlada para atender aos requisitos de qualidade do componente. Mediante a isso foi utilizada nesta pesquisa a TC devido a garantia de precisão do diagnóstico de falhas estruturais qualidade do processo de manufatura aditiva.

Neste contexto o presente artigo visa estabelecer um comparativo entre o processo de manufatura aditiva e o processo de fundição para a confecção de uma peça de aço inoxidável.

2 I REFERENCIAL TEÓRICO

Atualmente, a Quarta Revolução Industrial (Indústria 4.0), tem como fator marcante a integração que as tecnologias permitem entre os dispositivos e o ambiente virtual. Ocorre que ao introduzir sistemas inteligentes na indústria, a complexidade operacional é bastante reduzida, aumentando a robustez e segurança nos processos, e consequentemente, ocorre a redução dos custos e aumento da qualidade dos produtos e serviços.

Essas aplicações são mais independentes da ação humana quanto à operação visto que existe uma comunicação instantânea entre máquinas, processos, linhas de montagem e até mesmo unidades de produção. Dentre as várias aplicações, destacam-se a Manufatura Aditiva (M.A) como uma ferramenta que visa modernizar a rotina industrial, reduzindo as etapas de produção.

2.1 A Manufatura Aditiva

A Manufatura Aditiva foi definida por Gebhardt (2016), como uma técnica de Impressão 3D consistindo na criação de um objeto em formato desejado através da adição de materiais camada por camada. Seu princípio é baseado no fato de que todo objeto pode ser decomposto em diversas camadas e reconstruído com elas, independentemente de sua complexidade geométrica.

O autor Redwood (2017) explica que a manufatura aditiva se distingue dos métodos tradicionais de fabricação, a saber: usinagem e fundição. Enquanto a usinagem necessita da utilização de ferramentas diversas para fazer a subtração de partes do material, esculpindo-o em seu formato desejado, e a fundição depende da utilização de moldes que conformam o material derretido no formato do espaço vazio da forma, a impressão 3D trabalha a partir da adição de partes para a formação de um todo e não depende de moldes para a produção (Figura 1).

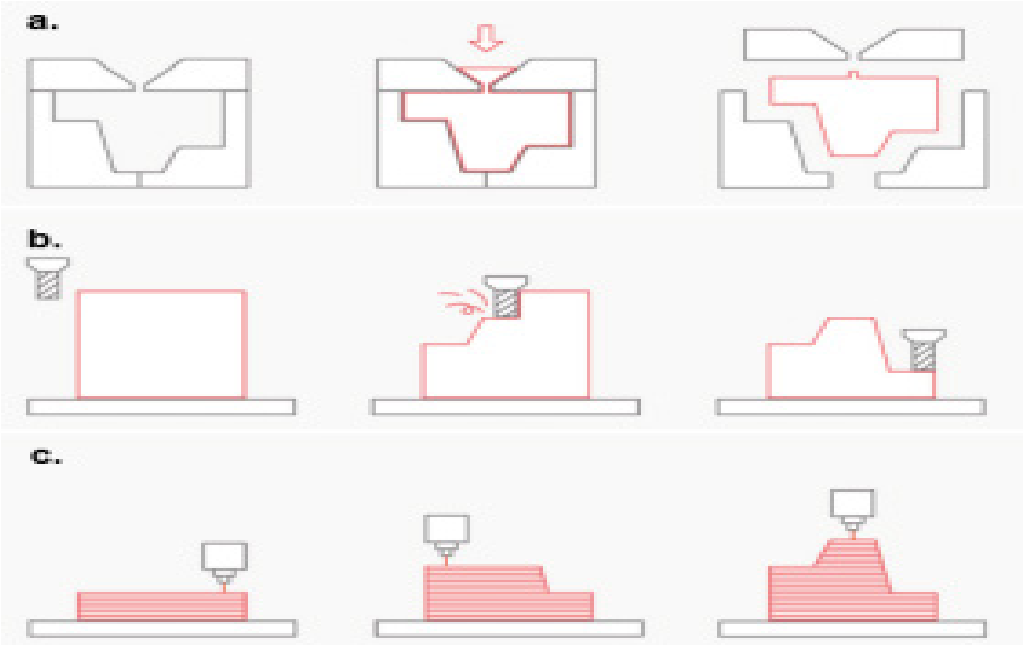


Figura 1- Comparativo entre (a) Fundição; (b) Usinagem; (c) Manufatura Aditiva

Fonte: Redwood, 2017.

2.2 Etapas do Processo de Produção por Manufatura Aditiva

Segundo Redwood (2017) relata que a produção por manufatura aditiva, independentemente do tipo de tecnologia empregada, deve ser constituída por cinco etapas básicas e constantes, na qual destaca-se a seguir:

- Elaboração de um modelo CAD da peça a ser projetada: A técnica que é utilizada para criação de um modelo virtual é o CAD (Computer Aided Design) que permite o desenvolvimento de esquemas realistas de peças e estruturas. Existe também a possibilidade de utilizar a engenharia reversa para adquirir um modelo digital da peça.

- Criação e manipulação do arquivo STL: A impressora 3D não consegue interpretar arquivos do tipo CAD, logo é necessário realizar a conversão dos mesmo para o arquivo *Standard Triangle Language* (STL). Este formato atua simplificando os modelos CAD que são complexos para a interpretação das impressoras, ele utiliza triângulos para descrever as superfícies dos objetos. Então, este arquivo STL é exportado para um programa que divide o design em camadas que serão usadas para construir as partes, esta divisão corresponde a uma segmentação da peça em camadas. O programa também permite que o operador da impressora 3D define parâmetros de construção da impressora especificando, altura da camada, e orientação da peça.

- Impressão: Como já foi citado anteriormente, cada umas das sete tecnologias de M.A, classificadas segundo a norma ISO/ASTM 52900:2021, fabricam peças de formas particulares, porém o método sempre é o de adição de materiais de camadas por camadas. O processamento é realizado em camadas, processadas da base até o topo, gerando-se a peça física através do empilhamento e aderência delas.
- Remoção do objeto impresso: A remoção da peça impressa depende do tipo de tecnologia utilizada, pois alguns métodos da peça impressa podem ser simplesmente removidos da plataforma de construção. Para outros métodos de impressão 3D, de aplicação industrial, a remoção é um processo técnico e requer ambiente controlado e procedimentos precisos para a retirada da peça do material envolto e da plataforma de construção.
- Pós processamento: Os procedimentos de pós-processamento também variam com o tipo de tecnologia de impressão utilizada, pois determinadas tecnologias podem requerer elementos para a cura antes da peça ser manuseada, outras podem necessitar realizar acabamento por usinagem enquanto outros permitem que as peças sejam manuseadas imediatamente.

De forma geral, independente da classe da tecnologia a ser empregada, num sistema de produção por M.A os procedimentos irão se manter constantes. A figura abaixo apresenta as etapas do procedimento de fabricação de um dado objeto por M.A (Figura 2).

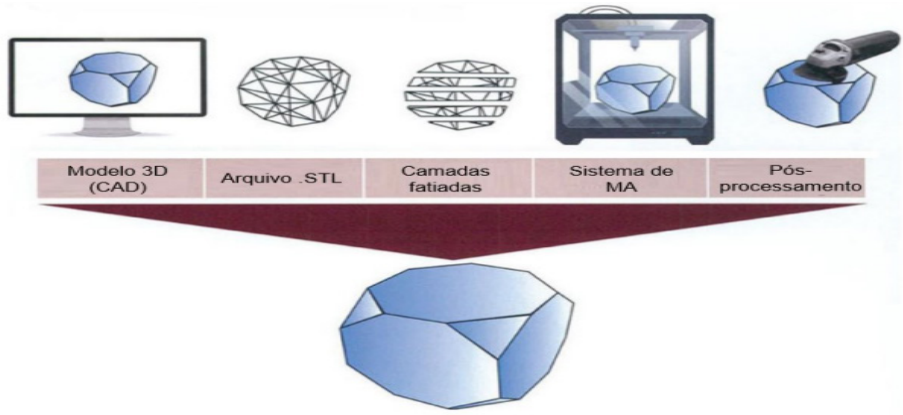


Figura 2: As etapas do processo de produção por M.A.

Fonte: Próprio autor (2022).

2.3 A Técnica de Tomografia Industrial Computadorizada

A Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos (ABENDI) estabelece que os ensaios não destrutivos (END) são técnicas para detecção e avaliação de falhas (defeitos e descontinuidades) nos materiais, mas sem alterar a integridade estrutural da peça durante o teste.

No setor industrial o END tornou-se uma ferramenta essencial para diagnosticar, previamente, as causas das falhas, um mau funcionamento, deterioração estrutural externa ou interna de alguma peça, entre outras causas. Ampliou-se a inclusão desta técnica no ciclo de processo de fabricação de produtos, principalmente, nos seus estágios finais de desenvolvimento, objetivando satisfazer aos requisitos de qualidade deles.

A Tomografia Industrial Computadorizada (TC) é considerada uma das técnicas do ensaio radiográfico digital conforme o Guia da ABENDI (2018). Este mesmo órgão descreve que nesta técnica a peça é exposta a um feixe estreito de raios X que a atravessa em vários planos para realizar combinações de diversas imagens de raios X processadas por computador, em diferentes ângulos, a fim de produzir imagens da seção transversal do objeto (Figura 3).

Estas imagens são obtidas girando-se a peça 360º em um eixo perpendicular ao feixe de raios X, projetando sua imagem em um detector do tipo flat painel. Após esse processo de aquisição, as imagens são usadas em um processo de reconstrução que gera um volume tridimensional (3D) da peça, permitindo que a mesma possa ser cortada virtualmente em planos para análise.

Assim sendo, a TC oferece uma possibilidade de visão única, tridimensional e não destrutiva de um corpo de prova. Segundo Frade (2016), a tomografia computadorizada industrial possui aplicações pelas quais permitem a reconstrução de objetos em diferentes formas e densidades, tendo sido utilizada em diversas aplicações industriais, tais como aplicações em processos que envolvem fluidos multifásicos, alimentos, polímeros, eletrônica e em engenharia reversa.

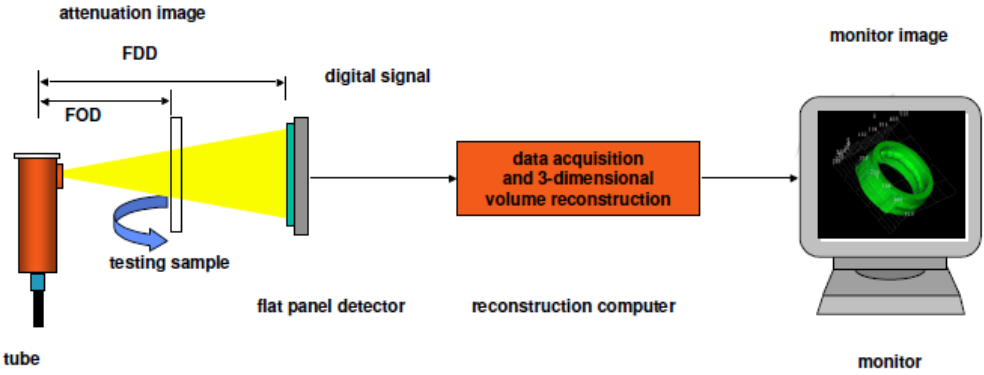


Figura 3: Exemplo de um Sistema de Inspeção por Tomografia Industrial Digital.

Fonte: Andreucci (2020).

Cabe ressaltar que a qualidade da imagem está associada a alguns parâmetros de aquisição, tais como: tensão de pico (kV); corrente do tubo (μA).

De acordo com Moreira (2021), tensão e corrente impactaram de forma relevante na qualidade das imagens, já que se aumentarmos a microamperagem (µA), aumentamos a intensidade do feixe de raios X e quando elevamos a quilovoltagem (kV), os feixes de raios X se tornam mais penetrantes na amostra.

Um exemplo do sistema utilizado para aplicação deste método para detecção de defeitos estruturais é apresentado na Figura 4.

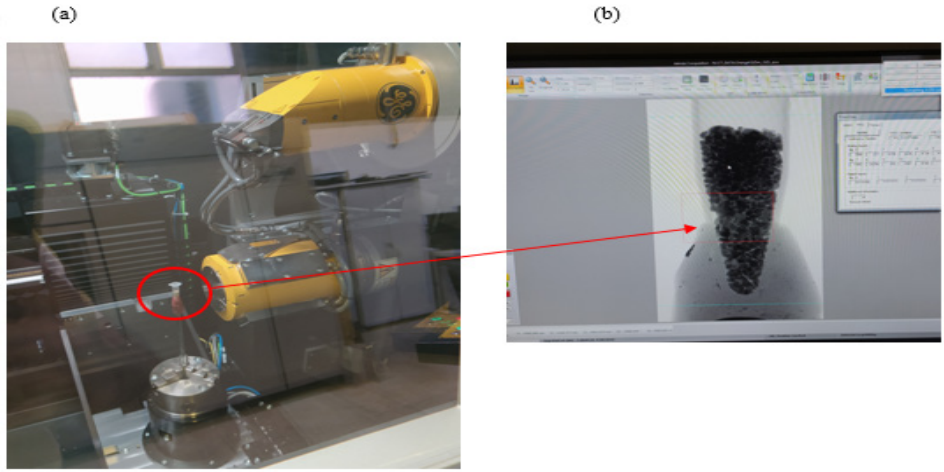


Figura 4 - Equipamento utilizado para o ensaio por TC, (a) Amostra hipotética; (b) Análise da Amostra hipotética.

Fonte: Próprio autor (2022).

O sistema é composto por um tubo de raio x, mesa rotatória e um painel do tipo flat painel. A amostra é fixada numa mesa rotatória na parte interior do equipamento onde é rotacionada 360º sob a incidência de um feixe de raio x. As imagens geradas são então reconstruídas para análise que é feita através do software de aquisição fornecido pelo fabricante do equipamento.

3 I MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa é caracterizada como qualitativa-descritiva, através de um estudo de caso com registro e interpretação dos dados coletados como procedimento metodológico.

Este método permite uma flexibilidade de aplicação do caso, pois no contexto da área industrial, as falhas costumam ser recorrentes e a estrutura de um caso pode ser aplicado para resolução de outras ocorrências em contextos diferentes.

Logo, como instrumento de coleta de dados utilizou-se um questionário com perguntas realizadas para o responsável da equipe técnica operante no desenvolvimento do produto com o intuito de estabelecer um comparativo, qualitativamente, sobre as vantagens da implementação do novo processo de fabricação.

Dentre as tecnologias desenvolvidas pelo laboratório de pesquisa em radiologia industrial, destacam-se:

- Sistemas de radiografia convencional e digital submarina;
- Sistema de radiografia digital on-line para avaliação de corrosão e soldas;
- Procedimentos de inspeção por radiografia e tomografia entre outras técnicas da Engenharia Nuclear.

Para este trabalho foi utilizado uma técnica de ensaio não destrutivo, a tomografia industrial que permite a modelação tridimensional do objeto ensaiado.

No intuito de estabelecer um comparativo das falhas estruturais entre os processos de manufatura aditiva e por fundição, foram dispostas duas peças de teste, ambas de material composto por aço inoxidável.

Para fins de análises e inspeção da peça-protótipo foi utilizado o tomógrafo industrial Phoenix V tomex m 300, do fabricante General Electric (GE), que é utilizado no laboratório da Instituição de ensino superior do Rio de Janeiro para realização de pesquisas acadêmicas e científicas (Figura 5).

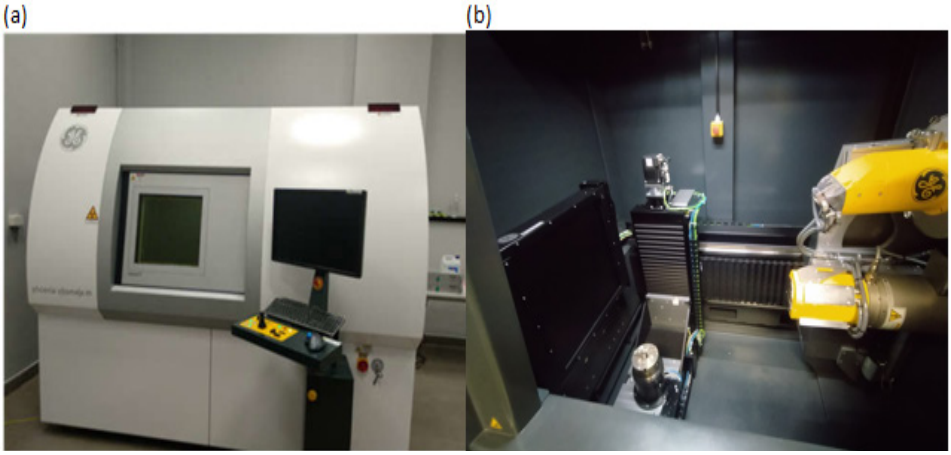


Figura 5 - Equipamento utilizado para o ensaio por TC, (a) visão exterior; (b) visão interior.

Fonte: Próprio autor (2022).

Foi utilizado o software VGStudio para a manipulação das imagens tomográficas, que foi desenvolvido pela Volume Graphics para visualização de uma imagem de alta qualidade. Ele possibilita gerar cortes 2D nas três dimensões, permite varredura ao longo dos cortes, com suas respectivas posições visualizadas na imagem 3D.

Foram utilizadas duas amostras composta por materia-prima de aço inoxidável sendo: uma peça teste produzida por manufatura aditiva e outra com mesmo design e dimensões, mas produzida em processo misto de fundição e usinagem, ambas com a finalidade de analisar a integridade estrutural do produto.

4 | RESULTADOS E DISCUSSÂO

4.1 Tomografia computadorizada

A figura 5 apresenta a imagem obtida por tomografia computadorizada da peça confeccionada por manufatura aditiva.

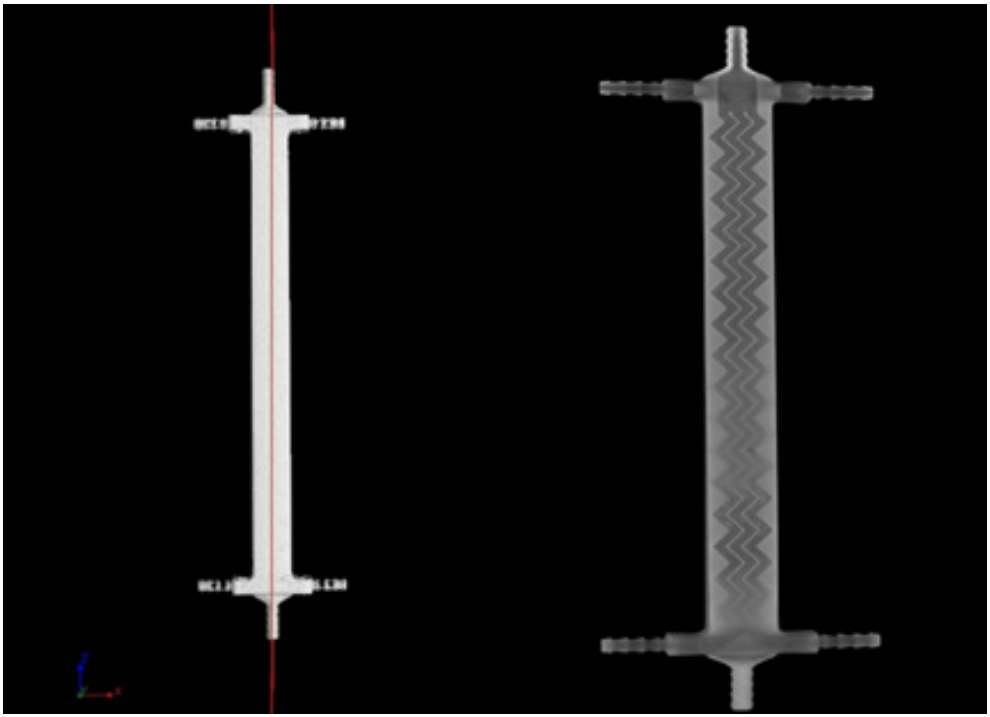


Figura 5 - Partes Interna e Externa da peça de teste produzida por MA.

Fonte: Próprio autor (2022).

Os dados obtidos pela tomografia computadorizada são apresentados em formato de três dimensões como mostra a Figura 6.

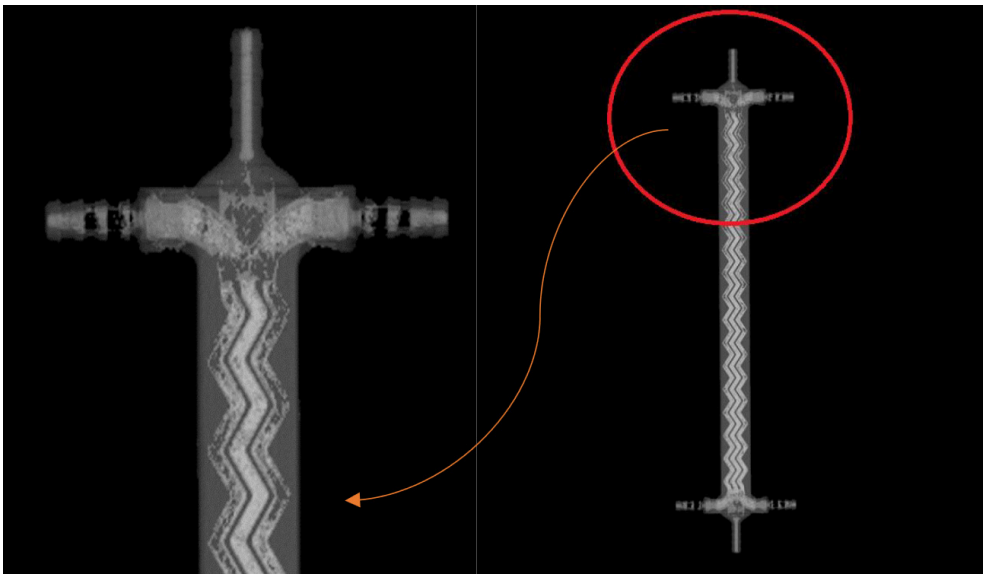


Figura 6: Peça de teste produzida por processo misto (Fundição e Usinagem).(a) Vista da peça inteira; (b) Vista da extremidade superior.

Fonte: Próprio autor (2022)

Uma faixa defeituosa pode ser observada na figura 6 (b). Sabe-se que a estrutura deve ser rígida e que os dois furos vazantes, em seu interior, não possuem porosidades. A presença de poros prejudicam a resistência do objeto analisado. Tal fenômeno ocorre devido a contração do metal durante o processo de solidificação.

Outras irregularidades são pontuadas nas regiões da imagem mais escuras, onde há perda de continuidade do tom de cinza.Tais falhas ocorrem devido a falta de fusão em determinados pontos.Por esta análise, é possivel verificar que há defeitos na extremidade superior propagando-se ao longo da peça até a extremidade inferior.

Partindo da análise do ponto de extremidade, foi observado que houve falta de definição no orifício quadrangular vazante e porosidades na parte interior ao longo da peça. Vale acrescentar que foi observado que nas partes de maiores espessuras foi encontrado uma menor incidência de defeitos.

Na Figura 7 são apresentados os dados obtidos através da análise por tomografia computadorizada da peça confeccionada por M.A.

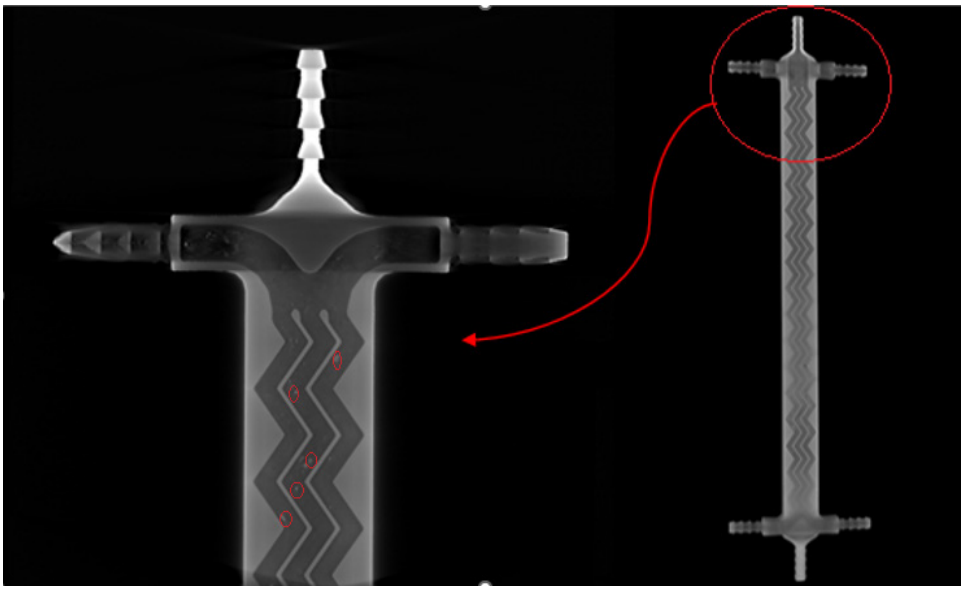


Figura 7: Imagens tomográficas da peça produzida por M.A.

Fonte: Próprio autor (2022).

Nesta situação não foi encontrado grandes quantidades de falhas e não houve presença de porosidades no interior conforme observado na peça feita por processo de fundição.

A Figura 7 apresenta uma tomografia computadorizada da peça confeccionada por MA, pode-se verificar junto a imagem tomográfica que os furos vazantes possuem boa definição e não há falhas que comprometam a funcionalidade da peça.

Desta imagem observa-se que a estrutura interna possui boa definição e não há presença de grandes vazios ou defeitos conforme mostrado na peça de figura 6 que apresentou diversos pontos de baixa fusão ao logo da peça.

Ainda sobre a Figura 7 foi marcado com círculos vermelho algumas descontinuidades observadas. Essas falhas são caracterizadas como micro poros e possuem dimensões bem reduzidas quando comparada com as falhas da peça confeccionada por fundição. Logo, comparando as figuras 6 e 7 é possivel dizer que o processo por manufatura aditiva possui melhor qualidade quando comparado com o processo por fundição.

4.2 Pesquisa empirica

Nesta etapa do estudo apresentam os resultados oriundos da aplicação de uma pesquisa empírica com o responsável técnico pela implementação do novo processo de fabricação por manufatura aditiva, cujo objetivo é destacar as vantagens e limitações observadas com a técnica em estudo, bem como traçar um comparativo com o método anterior (processo de fabricação por fundição).

Por se tratar de procedimento em desenvolvimento, tanto o engenheio responsável, como a empresa entrevistada preferem manter sigilo acerca de determinados pontos, e, por isso, não foi possível aprofundar o tema com o restante de equipe técnica.

No entanto, dentro do limite do que poderia ser compartilhado, quando foi perguntado sobre o interesse da empresa na implementação do novo processo de fabricação, ele relatou "que o interesse da empresa pela pesquisa da técnica de manufatura aditiva aconteceu pela busca na redução do tempo de produção, e na eficiência do acabamento do produto, já que no processo por fundição não há um bom acabamento".

Segundo o entrevistado, a implementação do método em estudo poderá proporcionar, ainda, a efetiva redução da quantidade de etapas do processo. "Foi possível a construção de uma peça complexa de forma mais ágil e com um acabamento satisfatório, dispensando a necessidade de muitas etapas de pós-processamento, que era efetuado no processo por fundição".

Quando perguntado sobre os benefícios da aplicação da Manufatura Aditiva, o entrevistado destacou quatro pontos cruciais como vantagens em relação à modalidade anterior:

1. "Não houve necessidade de uma grande equipe de pessoas envolvidas na produção e, tão pouco, de muitas ferramentas."
2. "O fato de não utilizar moldes reduziu bastante as etapas de produção o que influenciou no menor tempo de confecção."
3. "A geometria, um pouco complexa da peça, não interferiu no processo de produção, pois ainda assim apresentou boa qualidade no acabamento."
4. " Não teve muita sobra de material, praticamente toda a materia prima foi utilizada"

Entretanto, quando foi argumentado sobre algum ponto negativo, ele mencionou que "o custo para aquisição do equipamento de impressão ainda é muito elevado, então a peça foi confeccionada em um laboratório de processos metálicos em parceria com a empresa."

Sobre a pergunta referente ao uso de alguma técnica de ensaio não destrutivo adotado pela empresa, o entrevistado informou que "a empresa utiliza o ensaio radiográfico para inspeção de soldas e trincas em estruturas de peças metálicas e compósitos, já que permite a análise de uma maior quantidade de peças em um dado intervalo de tempo".

No momento que foi perguntado sobre a decisão da empresa em utilizar a tomografia computadorizada, o entrevistado informou que "foi devido a este método oferecer um conjunto de imagens precisas para a peça inteira, com bom detalhamento de defeitos e maior nitidez facilitando para análise do estudo do processo de manufatura aditiva".

Em uma análise conclusiva as respostas obtidas com a entrevista realizada, levando em consideração que o processo de fabricação anterior era baseado na técnica de fundição

(método que utiliza a disposição da matéria-prima fundida em moldes), e que tal método requeria uma etapa de acabamento de polimento do material (técnica de usinagem), o que demandava tempo e complicação para peças de geometrias mais complexas, sem falar, ainda, que a peça não apresentava boa qualidade de acabamento, já que inúmeros defeitos, ainda que micros, eram encontrados neste processo de fabricação, como, por exemplo, a porosidade e vazios – vide a imagem da tomografia supra colacionada.

O fato é que determinadas irregularidades/ defeitos comprometem a funcionalidade da peça, o que distoa totalmente do objetivo de melhoria pesquisado pela empresa. A aplicação da técnica da manufatura aditiva, uma vez que a mesma utiliza a impressão 3D como mecanismo de confecção, a partir da imagem desenvolvida, corrigindo, dessa forma, os defeitos observados pelo método anterior (fundição).

5 I CONCLUSÕES

O projeto abordou a contribuição do avanço tecnológico com o desenvolvimento dos processos de produção, dado que novos conceitos, ferramentas e técnicas surgem a partir de novas tecnologias e estas são capazes de transformar o setor industrial. Este contexto foi visto no cenário do projeto proposto onde uma inovação tecnológica possibilitou a melhoria de um processo de fabricação.

Além disso, com o auxílio da tomografia computadorizada foi possível constatar que o processo de fabricação por Manufatura Aditiva apresentou melhor qualidade estrutural quando comparado com o processo por fundição. Por mais que tenha sido observado por tomografia alguns micro-póros na amostra feita por MA, tal descontinuidade, não poderia contribuir com a perda do desempenho estrutural, isto devido ao tamanho reduzido destas falhas.

Ao contrário, a amostra confeccionada por fundição apresentou inúmeras porosidades de tamanho acentuado além de ter sido constatado pontos de falta de fusão no interior da estrutura. Estas falhas podem comprometer a qualidade estrutural da amostra ocasionando na perda de funcionalidade.

Por meio da entrevista, foi possível destacar os principais benefícios da aplicação da tecnologia de manufatura aditiva no sistema da empresa em questão. Foram apontados, principalmente, a possibilidade de tornar a produção enxuta e econômica visto que não houve necessidade de muitos funcionários para realizar a produção e o fato da amostra confeccionada por manufatura aditiva ter apresentado uma definição de acabamento superior à amostra feita por processo de fundição conforme comprovado por tomografiacomputadoriza.

Conclui-se que a manufatura aditiva possui inúmeras vantagens que agregam ao potencial competitivo de uma empresa, seja permitindo a redução de etapas do processo de produção, baixa intervenção humana e menor uso de matéria-prima, mas o custo

elevado de aquisição do equipamento pode ser um fator impeditivo para implantação desta tecnologia em empresas de pequeno porte.

REFERÊNCIAS

ABENDI, Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção. **Guia ABENI 2018.** Disponível em: http://abendici.org.br/download/GUIA_ABENDI_2018.pdf

Acesso: 07 dez 2022

ANDREUCCI, Ricardo: **Radiologia Industrial**, Abendi,2017.

Disponível em: https://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/radiologia_maio_2017.pdf

Acesso em: 23 out.2022.

FRADE, Luiz Felipe; CAMARGO, Stephany de Barros: **Conceitos e Aplicações de Tomografia industrial.** Taubaté, SP:UNITAU,2016.

Disponível em: http://repositorio.unitau.br/jspui/bitstream/20.500.11874/184/1/TTEM005-16.pdf

GEBHARDT A.; HÖTTER J.S.: **Additive Manufacturing: 3D printing for Prototyping and Manufacturing**, Hanser Publish Munich 2016

MOREIRA, Adriana J. Penha, 2021; **A MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS X PARA O ESTUDO DA MICROESTRUTURA DE ÓRGÃOS E SUAS PATOLOGIAS**, Dissertação de MSc., UFRJ/COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear - Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

NETTO, Alfredo Pieritz: **Organização do trabalho industrial**.1 ed. UNIASSELVI, 2016. Disponível em:https://www.uniasselvi.com.br/extranet/layout/request/trilha/materiais/livro/livro.php?codigo=30665

RAPOSO, Daniel; **Cultura, Design, Competitividade e Inovação Empresarial**. IPCB CAMPUS. Revista do Instituto Politécnico de Castelo Branco; N. 19, 2021, ISSN: 1647-9335. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/DanielRaposo3 /publication/360065406_Cultura_Design_ Competitividade_e_Inovacao_Empresarial/links/625fd5ac4173a21a0d210f72/Cultura-Design-Competitividade-e-Inovacao-Empresarial.pdf

REDWOOD, B.; SCHÖFFER, F.; GARRET, B. **The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications**. [S. l.]: 3D Hubs, 2017. 304 p. ISBN 9789082748505.

VITALE, M.; COTTELEER, M.; HOLDOWSKY, J. **An overview of additive manufacturing**. Defense AT&L, November-December, 2016. Disponível em: https://www.dau.edu/library/defense-atl/DATLFiles/ Nov-Dec2016/DATL%20Nov_Dec2016.pdf Acesso em: 07 dez 2022

CAPÍTULO 2

ESTUDO DOS MECANISMOS DE CORROSÃO EM JUNTAS SOLDADAS POR PROCESSOS MIG CONVENCIONAL E MIG PULSADO DE UMA LIGA DE ALUMÍNIO DA SÉRIE 5XXX

Data de submissão: 12/05/2023 *Data de aceite: 03/07/2023*

Emmanuelle Sá Freitas
Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Faculdade de Engenharia de Materiais
Marabá – Pará
http://lattes.cnpq.br/8640583652640865

Maria Adrina Paixão de Souza da Silva
Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Mecânica
Belém – Pará
http://lattes.cnpq.br/6642036918358829

Orivam Souza Lalor
Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Faculdade de Engenharia de Materiais
Marabá – Pará
http://lattes.cnpq.br/0246952957197459

Diego Gomes dos Santos
Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Mecânica
Belém – Pará
http://lattes.cnpq.br/3712522007242744

Ana Paula Silva Santos
Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Faculdade de Engenharia de Materiais
Marabá – Pará

RESUMO: As ligas de alumínio da série 5xxx encontram aplicações crescentes nas indústrias de fabricação naval devido suas propriedades únicas mecânicas e de corrosão. Entre os graus disponíveis nesta série de ligas, a liga de alumínio 5052-F é amplamente usada na fabricação de estruturas navais, máquinas marítimas e veículos subaquáticos. Conhecendo-se as problemáticas de processos de soldagem quanto à origem de heterogeneidades e a necessidade do controle microestrutural para preservar as propriedades das ligas e evitar a formação de fases deletérias, a presente investigação justifica-se pelo interesse estratégico para evitar perdas de materiais e, consequentemente, econômicas causadas por falhas microestruturais intrínsecas dos processos de soldagem e por ocorrência do fenômeno de corrosão, que pode ser potencializado com a formação de sítios ativos nas juntas soldadas. Desta forma, no estudo foram usadas juntas soldadas, obtidas por processos de soldagem MIG convencional e MIG pulsado, tomados como regiões principais de avaliação: metal base (MB); zona termicamente afetada (ZTA) e cordão de solda (CS), das quais foram caracterizadas suas macro e micrografias, bem como os mecanismos de corrosão por

meio de ensaios de imersão em solução de NaCl 0,5M em tempo de (30, 60 e 120) minutos e posterior correlações entre processos de soldagem e micrografias típicas. Analisando os resultados, o MB foi o mais susceptível à corrosão, independentemente do tempo de imersão, verificamos mecanismos simultâneos de corrosão localizada e corrosão generalizada nas superfícies. Verificou-se ainda que a região do (CS) apresentou como sendo a região menos susceptível à corrosão, em especial a amostra soldada pelo processo MIG convencional, independente do tempo de imersão em NaCl.
PALAVRAS - CHAVE: Liga alumínio 5052-F, microestrutura, mecanismos de corrosão, soldagem MIG, MIG pulsado.

STUDY OF CORROSION MECHANISMS IN JOINTS WELDED BY CONVENTIONAL MIG AND PULSED MIG PROCESSES OF AN ALUMINUM ALLOY OF THE 5XXX SERIES

ABSTRACT: 5xxx series aluminum alloys find increasing applications in the shipbuilding industries due to their unique mechanical and corrosion properties. Among the grades available in this series of alloys, 5052-F aluminum alloy is widely used in the manufacture of naval structures, marine machinery and underwater vehicles. Knowing the problems of welding processes as to the origin of heterogeneities and the need for microstructural control to preserve the properties of alloys and avoid the formation of deleterious phases. The present investigation is justified by the strategic interest to avoid material losses and, consequently, economic losses caused by intrinsic microstructural failures of the welding processes and by the occurrence of the corrosion phenomenon, which can be potentiated with the formation of active sites in the welded joints. Thus, in the study welded joints were used, obtained by conventional MIG and pulsed MIG welding processes, taken as main regions of evaluation: base metal (MB); thermally affected zone (ZTA) and weld bead (CS), of which its macro and micrographs were characterized, as well as the corrosion mechanisms by means of immersion tests in 0.5M NaCl solution in time of (30, 60 and 120) minutes and subsequent correlations between welding processes and typical micrographs. Analyzing the results, MB was the most susceptible to corrosion, regardless of the immersion time, we verified simultaneous mechanisms of localized corrosion and generalized corrosion on the surfaces. It was also verified that the region of the (CS) presented as being the region less susceptible to corrosion, especially the sample welded by the conventional MIG process, regardless of the time of immersion in NaCl.
KEYWORDS: Aluminum alloy 5052-F, microstructure, corrosion mechanisms, MIG welding, Pulsed MIG.

1 I INTRODUÇÃO

A busca por materiais com boas propriedades mecânicas, alta resistência à corrosão e, sobretudo, mais leves, vem em uma crescente procura. O alumínio, nesse contexto, surge como uma alternativa por apresentar um conjunto de propriedades interessantes que o coloca em uma posição de destaque. O baixo peso específico é uma das suas características mais notáveis, o que lhe confere uma gama extensa de aplicações

importantes, entre as quais se destaca a indústria naval e a automobilística, além desta característica, cita-se a facilidade de reciclagem que é vista como uma vantagem para a preservação do meio ambiente. Ressalta-se também a sua combinação com diversos outros materiais utilizados na engenharia, formando assim as ligas-alumínio (COLAÇO, 2019; SANTOS, 2016).

Dentre as ligas de alumínio, a 5052-F é uma liga de alumínio e magnésio que tem como principal característica a elevada resistência à corrosão combinado com um excelente equilíbrio de propriedades mecânicas, além de manter uma excelente ductilidade, resistência à corrosão e uma boa soldabilidade, sendo utilizada para diversos fins, principalmente como material na indústria naval. Atualmente, sabe-se o quanto é mais vantajoso utilizar ligas de alumínio ao invés de ligas de aço na confecção de embarcações, principalmente no que diz respeito à proteção contra oxidação e redução do peso dessas embarcações (SANTOS, 2016).

A corrosão de um metal é um problema iminente, na atmosfera a corrosão do alumínio é relativamente baixa e tende a diminuir ao longo do tempo de exposição, e em uma atmosfera marinha não é muito diferente, pois as ligas de alumínio e magnésio são muito resistentes à corrosão. A resistência da liga é aumentada segundo o grau de endurecimento a frio. A sua aplicação se estende não só na construção naval, e sim a todos os casos que se necessitem dessa propriedade específica (RIBEIRO et al, 2018).

Apesar de ser muito atrativo aos setores de transportes, no geral, as ligas de alumínio de alta resistência aplicadas na construção naval, apresentam uma microestrutura altamente controlada que é severamente modificada durante os processos de soldagem convencionais que são baseados na fusão dos metais envolvidos. Devido ao número elevado de aplicabilidade das ligas de alumínio e magnésio, o processo de união por soldagem se torna uma etapa indispensável para formações de materiais com geometrias complexas (MARQUES, 2009; COLAÇO, 2019).

Para Davis (1990; 2002), a soldagem é um dos processos de fabricação que possui maior importância na expansão do uso das ligas de alumínio para os diversos segmentos industriais. Dentre os processos utilizados para atender a estas exigências, os de maior importância atualmente são os que utilizam gás inerte de proteção, como os processos TIG e MIG. De acordo com Feistauer (2014), após a introdução do processo MIG (Metal Inert Gas), um grande passo na produção de uniões de qualidade e com boa resistência mecânica foi alcançado, e este passou a substituir os processos TIG em aplicações industriais (MATA, 2017).

Os problemas causados na soldagem estão relacionados com a formação de porosidade no cordão de solda, formação de inclusões, filmes óxidos, trincas de solidificação, redução da resistência mecânica nas zonas afetadas pelo calor, bem como, redução da resistência à corrosão, trincas induzidas pelo ambiente e resistência elétrica são problemas comuns observados em juntas soldadas em alumínio (KOU, 2003; FEISTAUER, 2014).

Desta forma, o trabalho se concentra a estudar as morfologias microestruturais e mecanismos de corrosão de juntas soldadas por processos MIG convencional e MIG pulsado de uma liga de alumínio da série 5052-F. As observações encontradas neste trabalho visam contribuir para a literatura, como base de consulta científica, e para a indústria na fabricação de estruturas de liga de alumínio em aplicações navais onde se busca conhecimento sobre a evolução do fenômeno da corrosão considerando a metalurgia da soldagem.

2 I MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento deste trabalho deu-se a partir do estudo de amostras de juntas soldadas de uma liga alumínio 5052-F, previamente investigadas por Santos (2016) com dados na literatura e que viabilizam partirmos de amostras já confeccionadas. Logo, o estudo se concentra em complementação de caracterizações microestruturais e avaliação dos mecanismos de corrosão em juntas soldadas por processos MIG convencional e MIG pulsado de uma liga alumínio 5052-F nas regiões: Metal base (MB); Zona termicamente afetada (ZTA) e Cordão de solda (CS).

2.1 Qualidade e caracterização microestrutural das juntas soldadas

a) Caracterização microestrutural

Para a caracterização das juntas soldadas pelos diferentes processos de soldagem, foram tomadas como regiões principais de avaliação: metal base (MB); zona termicamente afetada (ZTA) e cordão de solda (CS). Para tal, as micrografias foram realizadas com revelação por uso de solução de Keller (2HF+5HNO3+3HCl+10H2O) e captura de imagens em microscopia óptica.

b) Caracterização de superfície após ensaios de imersão

Considerando o estudo do mecanismo de corrosão das amostras ensaiadas, se faz necessária a observação das superfícies após a realização do ensaio de imersão. Como buscamos avaliar a susceptibilidade à corrosão de juntas soldadas por processos MIG convencional e MIG pulsado da liga de alumínio 5052-F, sabendo sobre as heterogeneidades intrínsecas dos processos de soldagem envolvidos e as regiões de interesse de estudo da solda (MB, ZTA e CS), é fundamental para o entendimento de como o fenômeno da corrosão evolui, observar em escala microestrutural, correlacionando essas observações com as características individuais das amostras e processo de soldagem e assim correlacionarmos: processo de soldagem/região observada/evolução da corrosão em escala micro.

Para a observação dos corpos de prova ensaiados, foi utilizado um microscópio óptico Olympus, com uma câmera auxiliar adaptada que viabiliza a captura da imagem, com aumento de 100x.

2.2 Mecanismos de Corrosão

a) Preparação de Corpos de Prova para Imersão

A avaliação dos mecanismos de corrosão deu-se como função: (i) processos de soldagem MIG convencional e MIG pulsado de uma liga alumínio 5052-F e ii) comparação entre regiões de interesse de estudo (MB, ZTA e CS). Os corpos de prova disponíveis para o estudo apresentavam superfpicies de trabalho de aproximadamente 1 cm^2 por 0,5 cm de espessura, com tal limitação, foi necessário o embutimento das amostras para facilitar o manuseio. Logo, as amostras da 5052-F correspondentes aos processos de soldagem MIG convencional (amostras 1) e MIG pulsado (amostras 2) foram embutidas a frio, resultando em corpos de prova para ensaios de imersão das regiões específicas (MB, ZTA e CS) para os dois processos de soldagem.

Posterior ao embutimento dos corpos de prova, suas superfícies seguiram para preparação metalográfica para então serem submetidas ao ensaio de imersão. Desta forma, as superfícies das amostras (1 e 2) foram lixadas em lixas de 600, 1200 e 2000 e 2500 mesh (SiC) com auxílio de detergente para minimizar as ranhuras nas superfícies a serem ensaiadas, em seguida limpas em álcool e secas com ar quente.

b) Ensaio de Imersão em NaCl

Com amostras devidamente preparadas, lixadas em lixas até 2500 mesh, o ensaio de imersão foi conduzido em NaCl 0,5M, soluções com íons cloretos para simular ambiente deletério, água do mar, a resistência à corrosão da liga. Desta forma, amostras da liga 5052-F correspondentes aos processos de soldagem MIG convencional (amostras 1) e MIG pulsado (amostras 2) embutidas a frio, das regiões específicas (MB, ZTA e CS) para os dois processos de soldagem foram submetidas à imersão em solução de NaCl 0,5M por tempos: 30, 60 e 120 minutos, respectivamente, e posteriormente tendo superfícies lavadas, secas e levadas a observação em microscópio óptico.

3 I RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização Macro e Microestrutural

A Figura 1 apresenta a macroestrutura das ligas soldadas por processo MIG convencional (Fig. 1 a) e por processo MIG pulsado (Fig. 1 b), onde verificamos a integridade e a qualidade do cordão de solda. Em ambos os corpos, destaca-se a presença de porosidades e imperfeições no cordão de solda. Na Figura 1 (a), com as setas em amarelo são destacados dois grandes poros ao centro da amostra, enquanto que na Fig. (b), os poros ocorrem no central e também alguns na extremidade superior e inferior do cordão de solda, representando maior fração de poros de poros no cordão de solda para a amostra soldada por processo MIG pulsado.

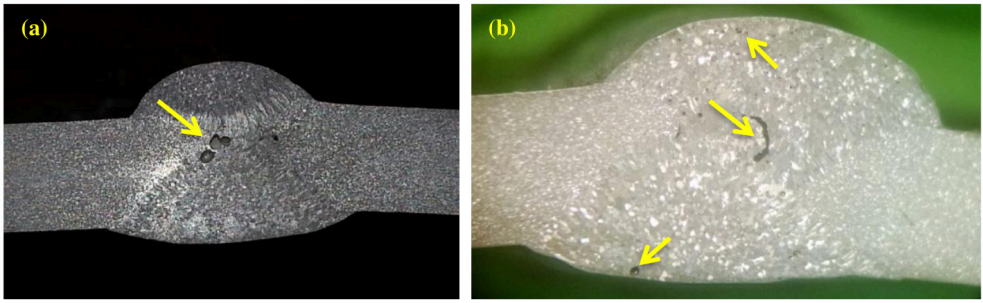


Figura 1 – Macroestruturas e qualidade dos processos de soldagem: (a) MIG Convencional e (b) MIG Pulsado.

Fonte: Autor, 2023.

A presença de imperfeiçoes e porosidades observadas nas imagens da Figura 1 influenciam diretamente nas propriedades da liga, como por exemplo, as propriedades mecânicas. Poros e imperfeições são causadores de tensões que contribui para possível nucleação e propagação de trincas na liga, ou seja, esta região, cordão de solda, fica mais suscetível a falhas e ainda se configura como região de heterogeneidade microestrutural que impacta na resistência à corrosão das ligas metálicas.

Além disso, Santos (2016) em seu estudo que aborda a solidificação em soldagem diz que a variação de composição entre deferentes pontos do material solidificado, é devido às elevadas velocidades de solidificação em soldagem, isto é, a segregação. Esta segregação é suficiente para causar variações localizadas de microestrutura, propriedades, e, mesmo, problemas de fissuração, particularmente no centro do cordão de solda e consequente variação frente ao fenômeno da corrosão.

De acordo com os estudos de Santos (2016), o corpo de prova 01, Figura 2 (a), a presença de uma ZTA composta de grãos equiaxiais de magnitude maior que os do metal de base, seguida de dois cordões de solda, um superior e um inferior, com estruturas colunares próximas à ZTA e equiaxiais no centro da zona. Já no corpo de prova 2, Figura 2 (b), há a presença de duas ZTAs compostas de grãos equiaxiais de magnitude maior que os do metal de base, seguida de duas regiões com o cordão de solda, uma superior e uma inferior, com estruturas colunares próximas à ZTA e equiaxiais no centro.

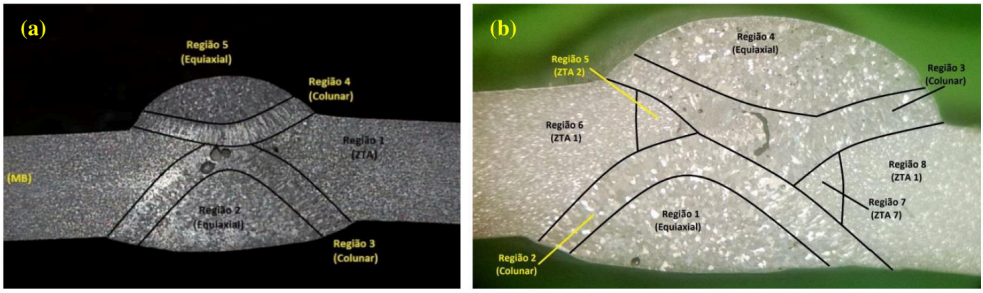


Figura 2 – Microestrutura com as zonas demarcadas: (a) corpo de prova 1 e (b) corpo de prova 2.

Fonte: Adaptado de Santos, 2016.

A soldagem feita na direção longitudinal da chapa faz com que a solidificação ocorra nesse sentido, ocasionando a formação de grãos colunares tanto na direção desse sentido de solidificação como no sentido da região central. Normalmente, na soldagem convencional os grãos gerados na interface da linha de fusão com o substrato crescem a partir dos grãos já solidificados do metal de solda, ao longo da linha de fusão e estes, no decorrer da solidificação, tendem a se alongar em direção ao centro do cordão. Entretanto, para o caso específico da pulsação, em decorrência da variação no perfil da linha de fusão, a direção de máximo gradiente térmica variará ciclicamente. Como resultado, a mudança cíclica na direção reduz o crescimento dos grãos para curtas distâncias, dando lugar à solidificação de pequenos grãos com diferentes direções de crescimento, conforme observado na Figura 2 (SANTOS, 2016).

Os resultados observados em relação à macroestrutura da ZTA também se encontram de acordo com a literatura (SANTOS, 2016). Assim como na amostra 1, a mudança estrutural facilmente visualizada é o crescimento de grão, que ocorreu quando realizado o primeiro passe, nas regiões 6 e 8, e no segundo passe, para as região 7.

O passe de reverso realizado no corpo de prova 2 possibilitou a formação do cordão de solda inferior, com tamanho de zona colunar maior que a superior, como pode ser observado na Figura 2 (b). Esse passe de reverso também pode ter tratado termicamente o cordão de solda superior, refinando a sua estrutura. Quanto à metalurgia da soldagem, as mesmas considerações feitas em relação ao corpo de prova 1 são válidas para o 2 (SANTOS, 2016).

3.2 Mecanismos de Corrosão

A Figura 3 demonstra os corpos de prova das três regiões de estudo (MB, ZTA e CS) das amostras resultantes dos processos de soldagem 1 (MIG convencional) e 2 (MIG pulsado) com superfícies preparadas na lixa até 2500 mesh, antes de serem submetidas ao ensaio de imersão em solução de NaCl 0,5M.

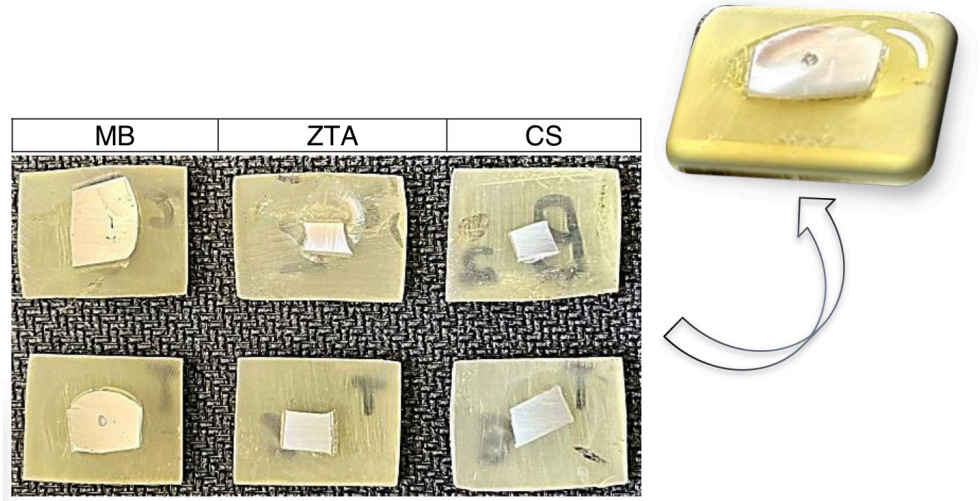


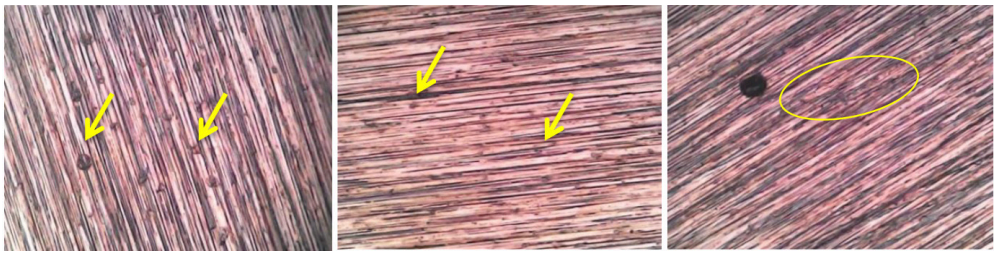
Figura 3 – Superfície de amostras preparadas para ensaios de imersão em solução de NaCl 0,5M, em detalhe da superfície imersa.

Fonte: Autor, 2023.

A Figura 3 representa a imersão em NaCl 0,5M realizado nas amostras para os tempos de 30 e 60 minutos. Todas as amostras dos processos (1 e 2), regiões de interesse MB, ZTA e CS, receberam solução simultaneamente, com o auxílio de um conta gotas para garantir que as superfícies não ficassem sem solução durante o tempo proposto para a imersão. Já para o tempo de 120 minutos, as amostras foram imersas em recipiente com volume de solução suficiente imergir as superfícies de ensaio.

Ao termino do tempo de imersão em solução de NaCl, todos os corpos de prova foram lavados em água corrente, álcool e secos em sguida para observação em microscópio óptico.

Logo, após os ensaios de imersão em tempos (30, 60 e 120) minutos, foi realizada a observação das respectivas superfícies em microscópio óptico. Destacamos que as ranhuras presentes nas superfícies dos corpos de prova apresentados nas Figuras 4 a 8, são provenientes da preparação da superfície, isto é, do lixamento antes do ensaio de imersão. A Figura 4 mostra corpos de prova do processo de soldagem MIG convencional (amostra 1) após imersão de 30 minutos em NaCl 0,5M, são demonstrados em setas amarelas pontos de corrosão localizada “pits. Percebemos pontos de corrosão localizada com maiores diâmetros na Figura 4 (a) correspondente à superfície de MB, enquanto que na micrografia da Figura 4 (b) correspondente a ZTA, observamos um mecanismos de ataque localizado totalmente distribuído e com menores diâmetros em toda superfície. Contudo, para a região do CS, não observamos nítidos pontes de corrosão como nas superfícies do MB e ZTA, levando ao entendimento de que estas regiões da solda são mais susceptíveis ao processo corrosivo que o CS.

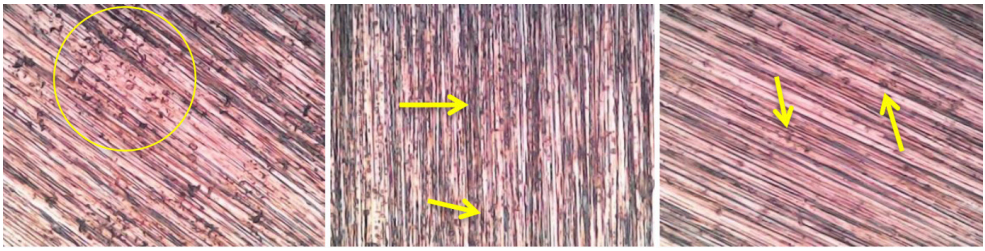


(a) (b) (c)

Figura 4 – Micrografias de superfícies após 30 minutos de imersão em NaCl 0,5M, Amostra 1: (a) MB, (b) ZTA e (c) CS, aumento de 100x.

Fonte: Autor, 2023.

De forma semelhante na Figura 5, o MB, ZTA e CS, da amostra de solda MIG pulsado, também, apresentaram visivelmente mecanismo de corrosão localizada, apontada pelas setas em amarelo, após a imersão por 30 minutos em solução de NaCl 0,5M. No MB, notam-se regiões com corrosão de aspecto mais generalizada, enquanto o CS e ZTA apresentam locais pontuais de corrosão. Diferente do que foi observado para a amostra soldada por MIG convencional, na região do CS para soldagem MIG pulsado observamos a ocorrência da corrosão localizada, Figura 5 (c) e com diâmetros mais grosseiros que para a região da ZTA, Figura 5 (b).



(a) (b) (c)

Figura 5 - Micrografias de superfícies após 30 minutos de imersão em NaCl 0,5M, Amostra 2: (a) MB, (b) ZTA e (c) CS, aumento de 100x.

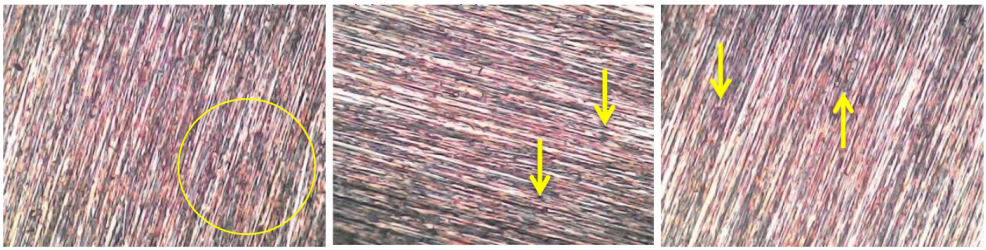
Fonte: Autor, 2023.

As Figura 6 e 7 mostram micrografias das amostras dos processos 1 e 2 e suas respectivas áreas de interesse MB, ZTA e CS após ensaio de imersão em NaCl 0,5M para o tempo de 60 minutos, evidenciando a presença de corrosão na superfície de ambas as amostras. Assim como observado para o tempo de 30 minutos de imersão, os corpos de prova correspondentes ao MB, para ambos os processos, apresentaram maior susceptibilidade à corrosão, seguido pela região da ZTA e menos susceptível à corrosão, a região do CS.

(a) (b) (c)

Figura 6 - Micrografias de superfícies após 60 minutos de imersão em NaCl 0,5M, Amostra 1: (a) MB, (b) ZTA e (c) CS, aumento de 100x.

Fonte: Autor, 2023.



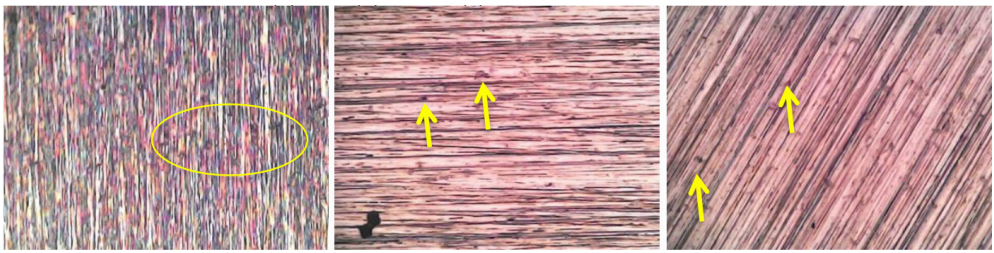
(a) (b) (c)

Figura 7 - Micrografias de superfícies após 60 minutos de imersão em NaCl 0,5M, Amostra 2: (a) MB, (b) ZTA e (c) CS, aumento de 100x.

Fonte: Autor, 2022.

De forma análoga, nas Figuras 8 e 9 são apresentadas micrografias das superfícies ensaiadas, após imersão em NaCl 0,5M para o tempo de 120 minutos. Nas micrografias são demonstradas em setas amarelas pontos de corrosão localizada, diferente do que foi observado para os tempos de 30 e 60 minutos, para o tempo de 120 minutos temos a presença significativa de corrosão localizada para a região do CS da amostra 1 (Figura 8c). Para o MB verificamos superfícies completamente oxidadas (Figuras 8a e 9a), onde temos mecanismos simultâneos de corrosão localizada e generalizada, e para os corpos de prova das ZTAs, assim como no CS, observamos frequentes pontos de corrosão localizada (Figuras 8b e 9c).

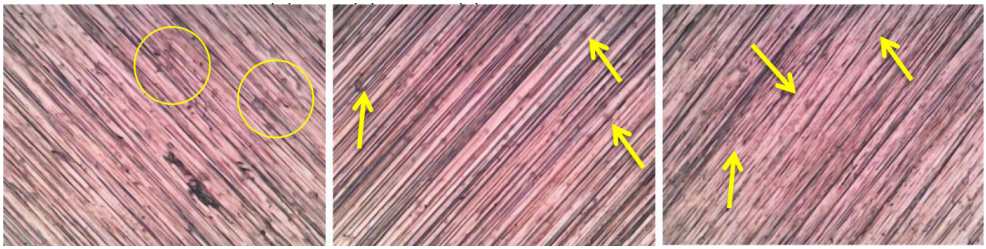
O tempo de 120 minutos de imersão dificulta a definição do mecanismo de corrosão predominante para as diferentes regiões/processo de soldagem MIG convencional e MIG pulsado, uma vez que para tempos de 30 e 60 minutos conseguimos observamos menor suscetibilidade à corrosão localizada para a mostra 1 na região do CS frente as outras regiões e em comparação com a mesma região (CS) da amostra 2 (MIG pulsado) que mostrou susceptibilidade à corrosão localizada em todos os tempo de imersão ensaiados.



(a) (b) (c)

Figura 8 - Micrografias de superfícies após 120 minutos de imersão em NaCl 0,5M, Amostra 1: (a) MB, (b) ZTA e (c) CS, aumento de 100x.

Fonte: Autor, 2023.



(a) (b) (c)

Figura 9 - Micrografias de superfícies após 120 minutos de imersão em NaCl 0,5M, Amostra 2: (a) MB, (b) ZTA e (c) CS, aumento de 100x.

Fonte: Autor, 2023.

No processo de soldagem verificamos ocorrência de rejeição de solutos e impurezas, juntamente com uma extração de calor de forma aproximadamente igual em todas as direções na parte central da peça que se torna força motriz suficiente para causar o aparecimento de inclusões, poros e outros pontos que facilitam a ocorrência da nucleação de novos grãos, resultando nas zonas equiaxiais centrais indicadas no cordão de solda em estudo (MODENESI, 2007) e provavelmente influenciam diretamente no mecanismo corrosão localizada observada nos corpos de prova ensaiados por imersão.

Desta forma os mecanismo de corrosão das amostras 1 e 2, a partir da metalografia, temos que entre todos os corpos de prova analisados o metal base (MB) foi mais susceptível à corrosão, independentemente do tempo de imersão, sendo observados mecanismos simultâneos de corrosão localizada (pites) e corrosão generalizada. Verificou-se ainda que o cordão de solda (CS) para os dois processos se apresentou como região menos susceptível à corrosão, em especial a amostra soldada pelo processo MIG convencional, entre todos os tempos de imersão em NaCl foi a que apresentou menor susceptibilidade à corrosão localiza e para o tempo de 30 minutos a ocorrência foi imperceptível na micrografia analisada. Contudo, a amostra 2 na região da ZTA foi a que apresentou maior susceptibilidade a evolução dos mecanismos de corrosão localizada e

generaliza, possivelmente associada a formação da formação das duas regiões de ZTA e consequentemente maior heterogeneidade microestrutural, potencializado as microcelulas galvânicas locais.

4 I 4 CONCLUSÃO

Portanto, a partir dos resultados obtidos neste trabalho podemos propor as seguintes conclusões:

- Observa-se no corpo de prova 01 a presença de uma ZTA composta de grãos equiaxiais de magnitude maior que os do metal de base, seguida de duas zonas fundidas, com estruturas colunares próximas à ZTA e equiaxiais no centro. O corpo de prova 2, por conta do processo de soldagem realizado, com a realização de passe de raiz, segundo passe e passe de reverso, ocorreu uma série de ciclos térmicos que resultaram na ZTA, que, por sua vez foi divida em duas regiões, uma mais refinada e outra com grãos mais grosseiros. Em ambos corpos de prova foram observados poros no central e também alguns na extremidade superior e inferior do cordão de solda, representando maior fração de poros de poros no cordão de solda para a amostra soldada por processo MIG pulsado, potencializando heterogeneidades e formação de microcelulas galvânicas na superfície soldada.

- Os mecanismo de corrosão das amostras 1 e 2, temos que entre os corpos de prova analisados o metal base (MB) foi mais susceptível à corrosão, independentemente do tempo de imersão, sendo observados mecanismos simultâneos de corrosão localizada (pites) e corrosão generalizada. O CS para os dois processos se apresentou como região menos susceptível à corrosão, em especial a amostra soldada pelo processo MIG convencional. Contudo, a amostra 2 na região da ZTA foi a que apresentou maior susceptibilidade a evolução dos mecanismos de corrosão localizada e generaliza, possivelmente associada a formação da formação das duas regiões de ZTA e consequentemente maior heterogeneidade microestrutural.

REFERÊNCIAS

CAPELARI, Tiago V.. **Avaliação da Geometria da Ferramenta e Parâmetros do Processo FSW na Soldagem da Liga de Alumínio AA 5052.** Dissertação de Mestrado - PPGEM, UFRGS, Porto Algre, 2006.

COLAÇO, D. B..**Caracterização e Avaliação das Tensões Residuais em Juntas da Liga de Alumínio AA 5083-O Soldadas pelo Processo FSW.** Dissertação de Mestrado - PPGEM/UAEM, Campina Grande, 2019.

DAVIS, J.R. ASM International (Ed.). ASM Handbook V.2: **Properties and Selection - Nonferrous alloys and Special-Purpose materials.** 10th ed., Metals Park, Ohio, 1990.

DAVIS, J.R. ASM International (Ed.). ASM Specialy Handbook: **Aluminum and Aluminum Alloys.** Ohio, 2002.

GENTIL, Vicente. **Corrosão.** 3 ed. rev. Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro 1996.

KOU, Sindo. **Welding metallurgy.** 2a ed.. John Wiley & Sons, 2003.

MARQUES, P.V. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia** / Paulo Villani Marques, Paulo José Modenesi, Alexandre Queiroz - 3ª edição atualizada. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

SANTOS, D. G. **Caracterização mecânica e metalúrgica de juntas soldadas de alumínio naval da série 5052-f.** Universidade Federal do Pará Instituto de Tecnologia Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. 2016.

FEISTAUER, E. E. et al. **Propriedades mecânicas de juntas soldadas com diferença de espessura pelo processo de soldagem por atrito linear com mistura em ligas de Al-Mg para aplicação na construção naval.** 2014.

RIBEIRO, M.P.S. et al. **Avaliação da influência do aquecimento da liga de alumínio AA5083 na corrosão em ambiente salino.** FATEC-SJC, São José dos Campos - SP, 2018.

MATA, S. I. D. **Análise do Processo MIG Pulsado-CA Aplicado à Soldagem do Alumínio 5052-H34**. Universidade Federal de Itajubá Instituto de Engenharia Mecânica Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica Dissertação de Mestrado. Itajubá, 2017.

CAPÍTULO 3

PROJETO DE UMA BANCADA DE TESTES COM DINAMÔMETRO DE INERCIA

Data de aceite: 03/07/2023

Luís Henrique Martins de Medeiros
Bolsista de Extensão PDTE/POLI 2020

Rogério Pontes de Araújo
Orientador

1 I INTRODUÇÃO

O Projeto BAJA SAE é um desafio lançado aos estudantes de engenharia que oferece a chance de aplicar na prática os conhecimentos adquiridos em sala de aula, visando incrementar sua preparação, pois possibilita uma relação entre os futuros engenheiros com profissionais da área, contribuindo com uma formação diferenciada para o mercado de trabalho (LIMPERT, 1999; SAE, 2019). Ao participar do Projeto Baja SAE, o aluno se envolve com um caso real de desenvolvimento de projeto, desde a concepção, projeto detalhado, até a construção de um pequeno veículo para uso fora de estrada, respeitando as normas da SAE Brasil para competições entre os veículos do tipo Mini Baja (SHIGLEY, 2005; ASMAR, 2010). O projeto ainda estimula o trabalho em equipe e a realização de atividades no formato de uma empresa, além de desenvolver as habilidades de engenharia através de pesquisas extracurriculares, bem como projeto de fabricação de um veículo em todas as suas etapas, podendo atuar em qualquer indústria do ramo automotivo, como por exemplo, as existentes no Polo Automotivo de Goiana-PE (BARBOSA, 2015; BERTO, 2015. A Equipe Corisco Baja vem crescendo e se destacando de forma progressiva ao longo dos anos, onde em 2019 atingiu a 9ª colocação na competição regional e 23ª colocação na competição nacional. Tudo isso, fruto de muito esforço e empenho por parte dos integrantes da equipe que coloca a Universidade de Pernambuco como uma das melhores instituições de ensino em engenharia do Brasil.

Para estarem habilitadas a participarem das competições, as equipes devem atender a diversas regras estabelecidas pela SAE (Society of Automotive Engineers), e dentre elas,

as especificações técnicas dos motores utilizados nos veículos. Com o intuito de prover melhores desempenhos e resultados nas competições, a Equipe Corisco decidiu projetar, construir e montar uma bancada de testes contendo um dinamômetro de inércia, para que seja possível obter dados acerca da potência fornecida pelo motor, e desta forma implantar possíveis melhorias. Com este dispositivo, será possível extrair dados com maior exatidão e de forma simples em relação aos testes de campo, trazendo ganhos significativos para a equipe. Além disso, será possível analisar diversos modelos de motores estacionários com poucas variações no projeto, a um custo relativamente baixo em comparação a outros modelos de dinamômetro disponíveis no mercado.

2 | OBJETIVOS

O objetivo geral da bancada de testes com dinamômetro de inércia é analisar o comportamento e desempenho do motor em diferentes configurações em condições de uso, para prover melhores resultados em competições. Os principais objetivos específicos são: projetar e desenvolver uma bancada de testes com dinamômetro de inércia; realizar testes e ajustes para validação do sistema; analisar o comportamento do motor Briggs & Stratton 10 hp, série 19, com o auxílio de sensores do tipo tacômetro e *softwares* de captação de dados desenvolvidos pela equipe.

3 | REFERENCIAL TEÓRICO

Com um disco conectado ao motor, se identifica a velocidade instantânea por meio de um sensor, e o intervalo de tempo por meio de um Arduino, se calcula a aceleração angular. Com a inercia rotacional do disco conhecida, visto que o mesmo é dimensionado para o projeto e com a aceleração captada, se calcula o torque, que ao ser multiplicado pela velocidade angular no momento, se conjectura a potência instantânea do motor.

4 | METODOLOGIA

Inicialmente será realizada uma pesquisa bibliográfica no diz respeito as principais características do projeto (Dinamômetro, inércia, estruturas mecânicas, eixos, mancais, telemetria, sensores e afins), com o estudo das bibliografias realizado, é possível desenvolver o projeto teórico tendo em vista as bibliografias e restrições do projeto, em seguida serão analisados os meios de validação do projeto, logo em seguida é possível realizar o planejamento e execução da construção do projeto, por último será realizada a validação e comparação dos dados com o projeto teórico.

5 I RESULTADOS

Esperasse que o projeto esteja concluído e validado antes da próxima competição que será em março de 2023 e que por meio dele a equipe tenha melhoria no que diz respeito a dinâmica longitudinal e estudos do motor, bem como um projeto que servirá como referência para o estudo de diversos motores a um baixo custo.

6 I CONCLUSÃO E DISCUSSÕES

Conclui-se que o modelo teórico e o CAD, foram finalizados de forma satisfatória, como apresentado no apêndice 1. Devido a demanda gerada pelo novo protótipo mini Baja, que será apresentado na 28° competição Baja SAE Brasil, em março de 2023, o projeto ainda não pode ser concluído, mesmo assim, estima-se sua conclusão antecedendo a competição, garantindo futuras melhorias de projeto no sistema de powertrain.

REFERÊNCIAS

BARBOSA, LUIS FELIPE FERREIRA MOTTA. Avaliação da Rigidez Torcional do Chassi de um Protótipo Baja SAE Através do Método de Elementos Finitos e de Ensaio Experimental. Guaratinguetá, 2015.

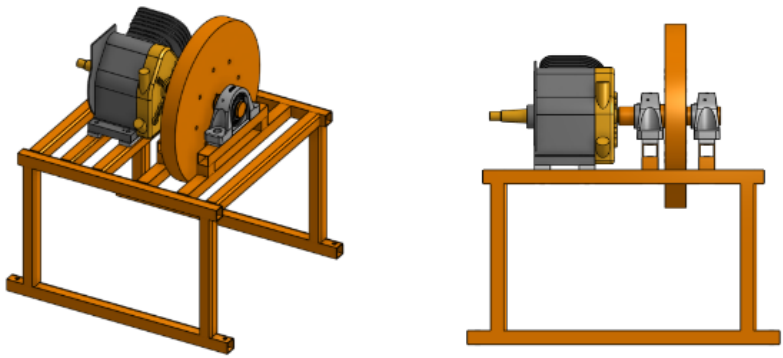
LIMPERT, ROBERT. Brake Design and Safety. Society of Automotive Engineers, 1999.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. Projeto de engenharia mecânica. 7. Ed. Bookman, 2005.

NICOLAZZI, Lauro. Uma introdução à modelagem quase estática de veículos automotores de rodas. Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.

APÊNDICES OU ANEXOS

Modelo CAD



Apêndice 1

SISTEMAS PERIÓDICOS: A EXTENSÃO DO PRINCÍPIO DE INVARIÂNCIA

Data de aceite: 03/07/2023

Wendhel Raffa Coimbra
Universidade Federal da Paraíba, Campus IV - CCAE

Luís Fernando Alberto Costa
Universidade de São Paulo, EESC - USP

Fabíolo Moraes Amaral
Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia da Bahia, IFBA

RESUMO: Neste trabalho, apresentamos uma extensão do princípio de invariância para a classe de sistemas dinâmicos não lineares descrita por um conjunto de equacões diferenciais ordinárias periódicas. Esta extensão permite que a derivada da função auxiliar V , ao longo das trajetórias do sistema, normalmente chamada função de Lyapunov, seja positiva em alguns conjuntos limitados. Esta característica importante simplifica o problema de exibir uma função do tipo Lyapunov e permite a aplicação do princípio em sistemas que não podem ser tratados com o princípio convencional, devido à não existência de uma função de Lyapunov ou de uma dificuldade em exibí-la. A extensão do princípio de invariância é útil para obter estimativas de atratores e regiões de atração de sistemas periódicos não lineares.

PALAVRAS-CHAVE: Sistemas Dinâmicos, Equações Diferenciais, Princípio de Invariância, Sistemas Periódicos.

ABSTRACT: In this paper, we present an extension of the invariance principle for the class of nonlinear dynami- cal systems described by a set of periodic ordinary differential equations. This extension allows the derivative of the auxiliary function V, along system trajectories, usually called Lyapunov function, to be positive in some bounded sets. This important feature simplify the problem of exhibiting a Lyapunov-like function and allows the application of the principle to systems that could not be treated by the conventional principle due to the non existence of a Lyapunov function or to the difficulty of exhibition one. The extension of the invariance principle is useful to obtain estimates of attractors and regions of attraction of periodic nonlinear systems.

KEYWORDS: Dynamic Systems, Differential Equations, Principle of Invariance, Periodic Systems.

1 | INTRODUÇÃO

O Princípio de Invariância de LaSalle é uma das ferramentas mais importantes para estudar o com- portamento assintotico de soluções de Equações diferenciais. LaSalle (1960a; 1960b) demonstrou este resultado para Equações diferenciais autônomas definidas em espaços de dimensão finita. Pos- teriormente, este resultado foi estendido para diversas outras classes de equações, incluindo: equações de diferença (LaSalle, 1977), equações diferenciais definidas em espaços de dimenSão in- finita (Hale, 1969), (Slemrod, 1970), equações diferenciais funcionais (Hale, 1993) e equações com descontinuidade no campo vetorial (siste- mas chaveados) (Bacciotti, 2005), (Goebel, 2008), (Hespanha, 2004), (Mancilla, 2006) e (Shevitz, 1994). O Princípio de Invariância também foi demonstrado para Equações diferenciais não autônomas, incluindo as periódicas (LaSalle, 1962), quase-periódicas (Miller, 1965), não autônomas retardadas (Rodrigues, 1970) e Equações diferenciais ordinárias mais gerais (Sell, 1967).

O Princípio de Invariância de LaSalle estuda o comportamento assintótico das soluções de um sistema sem a necessidade de conhecer explicitamente as soluções das equações diferenciais. Para isto, uma função escalar auxiliar, muitas vezes denominada função de Lyapunov, é utilizada. O principal problema do princípio de invariância é a não existência de um método específico para encontrar a função escalar auxiliar ou função de Lyapunov. Uma das condições mais restritivas na busca por esta função é que a derivada da mesma deve ser semi-definida negativa ao longo das trajetórias do sistema. Em vários sistemas, tais como os sistemas caóticos, com um grau de complexibilidade em suas trajetórias, é muito dif´ıcil exi- bir uma função escalar satisfazendo as condições do princípio de invariância e em particular satis- fazendo a condição da derivada ser semi-definida negativa ao longo das trajetórias, mesmo quando sua existência pode ser comprovada.

Uma versão mais geral do princípio de invariância, denominada extensão do princípio de invariância, simplifica em parte este problema, permitindo que a derivada da função escalar assuma valores positivos em algumas regiões limitadas do espaço. Esta extensão foi provada para o caso contínuo em (Rodrigues et al., 2000), para o caso discreto em (Alberto et al., 2007), para uma classe de Equações diferenciais com retardo limitado em (Rabelo, 2010) e para uma classe de sistemas cha- veados em (Valentino et al., 2012).

A extensão do princípio de invariância de La-Salle não exige que a derivada da função de Lya- punov seja sempre semi-definida negativa. Assim, diversos problemas que não poderiam ser tratados por esta teoria, devido a dificuldade ou impossi- bilidade de se exibir uma função de Lyapunov, passam a ser resolvidos pela extensão do princ´ı- pio de invariância.

A extensão do princípio de invariância, além da sua própria importância na teoria de estabilidade de sistemas dinâmicos não lineares, foi aplicada com sucesso em problemas de análise de estabilidade de sistemas elétricos de potência por Bretas (2003), Silva et al.

(2005), Bretas et al. (2005) e em problemas de sincronização Rodri- gues et al. (2000) e Mijolaro et al. (2010).

Neste trabalho, uma extensão do princípio de invariância para a classe de sistemas dinâmicos chamados sistemas periódicos é desenvolvida. Esta extensão é útil para estimar atratores e regioes de atração.

2 I PRELIMINARES

Considere o sistema dinâmico não autônomo não linear

$$x = f(t,x) \tag{1}$$

onde $x \in R^n$, $t \in R$ e f: $R \times R^n \longrightarrow R^n$ é uma função de classe C^1. A solução $s:R \times R \times R^n \longrightarrow R^n$ de (1) passando em x_o no tempo $t = t_o$ é detonada por $s(t,t_o,x_o)$ e satisfaz as seguintes propriedades: $s(t_0,t_0,x_0) = x_0$ e $s(t,t_1,s(t_1,t_0,x_0)) = s(t,t,x)$, $\forall t,t$ E R e $\forall\, x \in R^n$.

Definição 2.1 O sistema (1) é periódico com período $T \in R$ se $f(t + T, x) = f(t, x)$, $\forall t \in R$, $\forall x \in Rn$.

Em um sistema periódico periódico em que T é o período, as soluções satisfazem a seguinte propriedade:

$$s(t + T, t_0 + T, x_0) = s(t, t_0, x_0), \forall t \geq t_0 \geq 0, \forall x_0. \tag{2}$$

De fato, supondo que a função $x(t) = s(t, t_0, x_0)$ seja solução de (1), mostraremos que $x(t - T) = s(t - T, t_0, x_0)$, que é uma translação da solução no tempo, também é solução (1).

Como x(t) é solução da equação diferencial (1), então $\frac{d}{dt}s(t, t_0, x_0) = f(t, s(t, t_0, x_0))$.

Considere a mudança de variável: $t = \tau - T \longrightarrow dt = d\tau$. Na nova variável, obtém-se:

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\tau}s(\tau - T, t_0, x_0) &= f(\tau - T, s(\tau - T, t_0, x_0)) \\ &\overset{period.}{=} f(\tau, s(\tau - T, t_0, x_0)). \end{aligned}$$

Provamos portanto que $x(t-T)$ é uma solução de (1) e em particular é a solução que satisfaz $x(t_0 + T) = x_0$. Pela unicidade da solução, temos que $s(t - T, t_0, x_0) = s(t, t_0 + T, x_0)$.

Fazendo $t = u + T \longrightarrow u = t - T$, podemos concluir a partir da igualdade anterior que $s(u, t_0, x_0) = s(u+T, t_0 +T, x_0)$. Para esse mesmo período T , pode-se mostrar por indução que

$$s(t, t_0, x_0) = s(t + kT, t_0 + kT, x_0), \forall\, k \in Z. \tag{3}$$

Se o sistema (1) é autônomo, isto é, se f não depende explicitamente de t, Então podemos pensar neste sistema como um sistema periódico com um período arbitrário. Portanto, todos os resul- tados apresentados abaixo para os sistemas pe- ri´odicos aplicam-se igualmente bem aos sistemas autônomos.

Definição 2.2 Seja x0 $\in R^n$, t0 $\in$ R. Um ponto p $\in R^n$ é chamado um **ponto ω-limite** da trajetória $s(t, t_0, x_0)$ se existe uma sequência {ti} de nu´meros em [t0, +∞) tal que ti$\longrightarrow$+∞ e

$$\lim_{i\to\infty} \|p - s(t_i, t_0, x_0)\| = 0.$$

O conjunto dos pontos ω–limites de s(·, t , x) chamado de conjunto **ω-limite** de s(·, t0, x0) e é denotado por ω(t0, x0).

Definição 2.3 Um conjunto M $\subseteq R^n$ é chamado de **conjunto invariante** com relação à equação diferencial (1) se, para cada $x_0 \in$ M, existir $t_0 \in$ R tal que $s(t, t_0, x_0) \in$ M, ∀t $\in$ R.

Definição 2.4 Um conjunto M $\subseteq$ Rn é chamado de conjunto positivamente invariante com relação à equação diferencial (1) se, para cada $x_0 \in$ M, existir $t_0 \in$ R tal que $s(t, t_0, x_0) \in$ M, ∀t ≥ t_o.

Os Lemas (2.1), (2.2) e (2.3) discutem propriedades de conjuntos ω–limite.

Lema 2.1 (Vidyasagar, 1993) O conjunto ω- limite $\omega(t_o, x_o)$ da solu¸cao $s(t, t_o, x_o)$ do sistema (1) é um conjunto fechado.

A propriedade de ser fechado é verdadeira para todos os conjuntos limites. Quando a solução é limitada, ganham-se algumas propriedades importantes.

Lema 2.2 (Vidyasagar, 1993) Suponha que a solução $(\cdot, t_0, x_0)$ de (1) seja limitada para t ≥ to. Então, o conjunto ω(t0, x0) é não vazio, limi- tado, conexo e $d(s(t, t_0, x_0), \omega(t_0, x_0)) \to 0$ quando t → +∞.

Em geral, conjuntos limites de sistemas não autônomos não são invariantes. No caso particular de sistemas periodicos e autônomos, os conjuntos limites de soluções limitadas são também invariantes.

Lema 2.3 (Vidyasagar) Suponha que o sistema (1) seja periódico. Então $\omega(t_0, x_0)$ é um conjunto invariante.

Demonstração

Queremos mostrar que o conjunto ω-limite é invariante, logo, dado p ∈ ω(t0, x0), precisamos mostrar que existe um tempo inicial τ ∈ R tal que s(t, τ, p) ∈ ω(t , x), ∀ t ∈ R.

Dado $p \in \omega(t0, x0)$, temos que existe uma sequência $\{ti\}$, $ti \to \infty$ tal que $\lim_{i\to\infty} ||p - s(t_i, t_o, x_0)|| = 0$ quando $ti \to \infty$.

Seja T o período de (1) de modo que valha (3). Para cada i, encontra-se um inteiro k_i tal que $t_i - k_iT \in [0, T)$. Então a sequência $\{\tau i\} = \{ti - kiT\}$ é limitada, e portanto admite uma subsequência convergente. Escolha tal subsequência $\{\tau'_i\} = \{t'_i - k'_iT\}$ e enumere mais uma vez como $\{\tau_i\}$. Seja $\tau \in [0, T]$ seu limite.

Vamos mostrar que $s(t + k_iT, t_o, x_o) \to s(t, \tau, p)$ quando $i \to \infty$ para todo $t \in R$ e que portanto $\omega(t_o, x_o)$ é um conjunto invariante.

Das propriedades de fluxo, tem-se as seguintes igualdades:

$s(t+ k_iT, t_o, x_o) = s(t + k_iT, t_i, s(t_i, t_o, x_o)) = s(t + k_iT, \tau_i + k_iT, s(t_i, t_o, x_o)) = s(t, \tau_i, s(t_i, t_o, x_o))$.

Da continuidade das soluções com relação às condições iniciais temos que $s(t, \tau_i, s(t_i, t_o, x_o)) \to s(t, \tau, p)$ quando $i \to \infty$.

Portanto $s(t, \tau, p) \in \omega(t0, x0)$.

3 I FUNÇÕES ESCALARES E CONJUNTOS DE NÍVEL INVARIANTES

Dado uma função escalar $V : R \times R^n \to R$ de classe C1, definiremos dois conjuntos de nível:

$$S(L) := \{x \in R^n : \exists t \in R \text{ tal que } V(t, x) \leq L\}$$

e

$$A(L) := \{x \in R^n : V(t, x) < L, \forall t \geq 0\}.$$

Sob certas condições sobre a derivada da função escalar V, podemos mostrar que os conjuntos de nível S(L) e A(L) possuem algumas propriedades de invariância.

Lema 3.1 Considere o sistema (1) e seja $V: R \times R^n \to Rn$ uma função de classe C1. Se $V \leq 0$, então S(L) é um conjunto positivamente invariante.

Demonstração. Dado $x_0 \in S(L)$, existe $t_0 \in R$ tal que $V(t_0, x_0) < L$. Mostraremos que $s(t, t_0, x_0) \in S(L)$, $\forall t \geq t0$.

Como V é decrescente e $s(\cdot, t_0, x_0)$ é uma função contínua, Então para todo tempo $\tau \geq t0$ te- mos que $V(\tau, s(\tau, t_0, x_0)) \leq V(t_0, s(t_0, t_0, x_0)) = V(t_0, x_0) < L$.

Assim, para todo $\tau \geq t_0$, $s(\tau, t_0, x0) \in S(L)$, o que prova que o conjunto S(L) é positivamente invariante.

Lema 3.2 Considere o sistema (1) e seja $V: R \times R^n \to R^n$ uma função de classe C1 tal que $V^{\cdot} \leq 0$. Suponha que $x_0 \in A(L)$, Então a solução $s(t, t_0, x_0) \in S(L)$, $\forall t \geq t_0$, $\forall t_0$.

Demonstração. Seja $x_0 \in A(L)$. Como $A(L) \subset S(L)$, Então $x_0 \in S(L)$. Do Lema 3.1 sabemos que S(L) é positivamente invariante e portanto $s(t, t_0, x_0) \in S(L)$, $\forall t \geq t_0$, $\forall t_0$. Portanto, segue- se a tese.

Os Lemas 3.1 e 3.2 estudam a invariância de S(L) e A(L) quando $\dot{V} \leq 0$. Quando a derivada de V não é semi-definida negativa, podemos ainda obter propriedades similares de invariância impondo algum controle sobre a regiao onde a derivada de V fica positiva. Os Lemas 3.3 e 3.4 a seguir estudam estas propriedades.

Lema 3.3 Considere o sistema (1) e seja $V : R\times R^n \to R^n$ uma fun¸cao de classe C1 peri´odica com período T . Seja $C \supseteq \{x \in S(L) : \exists t \geq 0, \dot{V}(t, x) > 0\}$ e admita que $\sup_{(t,x)\in[0,T]\times C}$ $V(t, x) = l < L$, Então S(L) é um conjunto positivamente invariante.

Demonstração. Seja $x_0 \in S(L)$. Vamos divi- dir a prova em duas partes. Suponha primeiramente que $s(t, t_0, x_0) \notin C$, $\forall t \geq t_0$.Então $\dot{V}(t, s(t, t_0, x_0)) \leq 0$, $\forall t \geq t_0$, ou seja, V é decres- cente e entao $V(t, s(t, t_0, x_0)) \leq V(t0, x0) < L$, $\forall t \geq t0$. Assim, $s(t, t0, x0) \in S(L)$ para todo $t \geq t_0$.

Agora, suponha que exista um tempo $t_1 \geq t_0$ tal que $s(t_1, t_0, x_0) \in C$ e suponha por con- tradição que exista um tempo $t_2 > t1$ tal que $s(t_2, t_0, x_0) \in/ S(L)$. Então $V(t_2, s(t_2, t_0, x_0)) > L$ e, da continuidade da função V e da solução s, existe um tempo $t*$ tal que $V(t*, s(t*, t_0, x_0)) = L$. Sabemos também que $C \subset S(L)$ e que o m´aximo da função V no conjunto C é $l < L$. Portanto, existe um tempo $\tilde{t}$ tal que $V(\tilde{t}, s(\tilde{t}, t_0, x_0)) = l$ e $s(t, t_0, x_0) \in S(L) - C$ para todo $t \in (\tilde{t}, t*)$. Como $l<L$, Então deve existir um tempo $\hat{t} \in (\tilde{t}, t*)$ tal que $\dot{V}(\hat{t}) > 0$. Mas isto contradiz o fato de que $\dot{V} \leq 0$ fora do conjunto C e portanto a hipo´tese de que a solução sai do conjunto S(L) é falsa. Portanto S(L) é um conjunto positivamente invariante.

Lema 3.4 Considere o sistema (1) e seja $V : R\times R^n \to R^n$ uma função de classe C1 periódica com período T . Seja $C \supseteq \{x \in S(L) : \exists t \geq 0, \dot{V}(t, x) > 0\}$ e admita que $\sup_{(t,x)\in[0,T]\times C}$ $V(t, x) + l < L$. Suponha que $x_0 \in \forall(L)$, então a solução $s(t_l, t_o, x_o) \in S(L)$, $\forall t \geq t_0$, $\forall t_0$.

Demonstração. Seja $x_0 \in A(L)$. Como $A(L) \subset S(L)$, então $x_0 \in S(L)$. Sabemos que, pelo Lema 3.3, S(L) é positivamente invariante e portanto $s(t, t_0, x_0) \in S(L)$, $\forall t \geq t_0$, $\forall t_0$. Portanto, segue-se a tese.

4 I EXTENSÃO DO PRINCÍPIO DE INVARIÂNCIA

4.1 Princípio de Invariancia de LaSalle para Sistemas Periódicos

Nesta seção, uma versão do princípio de invariância de LaSalle (1960) para a classe de sistemas periódicos é apresentada.

Teorema 4.1 (Princípio de Invariância de LaSalle para Sistemas Periódicos) Suponha que o sistema (1) seja periódico, com período T, e $V: R \times R^n \to R^n$ seja uma função de classe C^1 tal que V seja periódica e com o mesmo período do sistema (1). Seja $L \in R$ uma constante real, e considere os conjuntos S(L) e A(L). Suponha que S(L) seja limitado e $\dot{V}(t, x) \leq 0$, $\forall t \in [0, T)$, $\forall x \in S(L)$. Defina $E := \{x \in S(L) : \exists t \geq 0$ tal que $\dot{V}(t, x) = 0\}$. Seja B o maior conjunto invariante contido em E. Então as seguintes afirmações são verdadeiras:

- $x_0 \in A(L) \Rightarrow s(t, t_0, x_0) \to B$ quando $t \to +\infty$ para todo $t_0 \in R$;
- $x_0 \in S(L) \Rightarrow \exists t0$ tal que $s(t, t_0, x_0) \to B$ quando $t \to +\infty$.

Demonstração. Seja $x_0 \in A(L)$. Pelo Lema 3.2, sabemos que $s(t, t_0, x_0) \in S(L)$, $\forall t \in [t_0, \omega_p)$, onde ω_p é o tempo maximal de existência da solução s.

Como S(L) é limitado, $\omega p = +\infty$ e a solução $s(t, t_0, x_0)$ existe e é limitada para todo $t \geq t_0$. Pelo Lema 2.2, podemos afirmar que $\omega(t_0, x_0)$ é não vazio e $d(s(t, t_0, x_0), \omega(t_0, x_0)) \to 0$ quando $t \to +\infty$.

Por outro lado, $V^{\cdot}(t, s(t, t_0, x_0)) \leq 0$ $\forall t \geq t0$, $V(t, s(t, t_0, x_0))$ é decrescente e por V ser contínua e periódica em t e, pelo fato de S(L) ser limitado, temos que V é limitada, e em particular, inferior- mente limitada para $t \geq t0$. Então, existe $\alpha \in R$ tal que $V(t) \to \alpha$ quando $t \to +\infty$.

Seja $p \in \omega(t_0, x_0)$. Então existe uma sequência $\{t_i\}$,com $t_i \to \infty$, tal que $s(t_i, t_0, x_0) \to p$. Logo, $V(t_i, s(t_i, t_0, x_0)) \to \alpha$ quando $i \to \infty$. Para cada i, encontra-se um inteiro ki tal que $t_i + k_iT \in [0, T)$. Então a sequência $\{\tau_i\} = \{t_i - k_iT\}$ é limi- tada, e portanto admite uma subsequência conver- gente. Escolha tal subsequência $\{\tau_i\} = \{t - k_iT\}$ e enumere mais uma vez como $\{\tau_i\}$. Seja $\tau \in [0, T)$ seu limite.

$V(t'_i, s(t'_i, t_0, x_0)) = V(\tau'_i + k_iT, s(t'_i, t_0, x_0)) \overset{\text{period. de V}}{=} V(\tau'_i, s, (t'_i, t_0, x_0))$ onde $t'_i = k'_iT$. Conclui-se portanto que $\alpha + \lim_{i\to\infty} V(t'_i, s, (t'_i, t_0, x_0)) = \lim_{i\to\infty} V(\tau'_i, s, (t'_i, t_0, x_0)) \overset{\text{cont.. de V}}{=} V(\tau, p)$.

Vamos mostrar que $V(u, s(u, \tau, p)) = \alpha$, $\forall u \in R$. De fato, da demonstração do Lema 2.3, temos que $s(u + k_iT, t_0, x_0) \to s(u, \tau, p)$ quando $i \to \infty$. Logo, $\alpha = \lim_{i\to\infty} V(u + k_iT, s(u + k_iT, t_0, x_0)) = \lim_{i\to\infty} V(u, s(u + k_iT, t_0, x_0)) = V(u, s(u, \tau, p))$. Pela invariância de $\omega(t_0, x_0)$ temos que $s(t, \tau, p) \in \omega(t_0, x_0)$, $\forall t$. Logo $V(t, s(t, \tau, p)) = \alpha$, $\forall t \Rightarrow \dot{V}(\tau, p) = 0$. Portanto, para cada $p \in \omega(t_0, x_0)$ existe tempo τ tal que $\dot{V}(\tau, p) = 0$.

Portanto, podemos afirmar que $p \in E$, logo $\omega(t_0, x_0) \subseteq E$, e por $\omega(t_0, x_0)$ ser um conjunto invariante segue que $\omega(t_0, x_0) \subseteq B$. Portanto, $s(t, t_0, x_0) \to \omega(t_0, x_0) \subset B$ quando $t \to +\infty$.

Para provar a segunda afirmaçãoo, considere $x_0 \in S(L)$. Pelo Lema 3.1, temos que existe t_0 tal que $s(t, t_0, x_0) \in S(L)$, $\forall t \in [t0, \omega p)$, onde ωp é o tempo maximal de existência da solução s.

Como S(L) é limitado, $\omega_p = +\infty$ e a solução $s(t, t_0, x_0)$ existe e é limitada para todo $t \geq t_0$. De maneira an´aloga ao caso em que $x_0 \in A(L)$, prova-se que $\exists t_0$ tal que $s(t, t_0, x_0) \to B$ quando $t \to +\infty$.

A Figura 1 ilustra o Teorema 4.1.

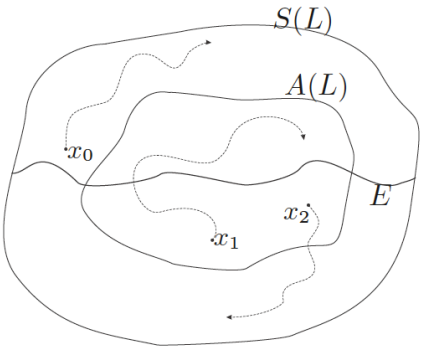


Figura 1: Interpretação geométrica do princípio de invariância de LaSalle para Sistemas Periodicos. Para as condições iniciais x_1 e x_2 em A(L), temos que as soluções não saem de S(L) e, para condição inicial x0 em S(L), a solução não sai de S(L).

Exemplo 4.1 Considere o sistema não linear e periódico descrito pela equação diferencial:

$$\begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = -y - (2 + \sin(t))x \end{cases}$$

Solução. A origem é um ponto de equilíbrio do sistema. Seja V dada por V (t, x, y) = $x^2 + \frac{y^2}{2+\sin(t)}$. Note que V é periódica com o mesmo período do sistema. A derivada de V ao longo das soluções é dada por:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t,x,y) &= -\frac{4+2\sin(t)+\cos(t)}{(2+\sin(t))^2}y^2 \\ &\leq 0, \forall t \geq 0, \forall x, y. \end{aligned}$$

Temos que V é localmente positiva definida e que a derivada é semi-definida negativa, satis- fazendo as condições do Teorema 4.1. A função V é radialmente ilimitada e portanto os conjuntos S(L) e A(L) são limitados para qualquer L > 0. Portanto, todas as condições do teorema 4.1 estao satisfeitas e todas as soluções deste sistema tendem, para o maior conjunto invariante B contido em E := {(x, y) ∈ S(L) : y = 0}. Explorando o campo vetorial, observa-se que $\dot{y}$= 0 apenas na origem, logo, a origem é o único conjunto invariante contido em E. Consequentemente todas as soluções tendem para a origem quando t → + ∞, ou seja, a origem é um ponto de equilíbrio globalmente atrativo.

Exemplo 4.2 Considere o sistema não linear e periódico descrito pela equação diferencial:

$$\begin{cases} \dot{x} = -x + y(2 + \sin(t)) \\ \dot{y} = -x(2 + \sin(t)) - y \end{cases}$$

Solução. A origem é um ponto de equilíbrio do sistema. Seja V a função de Lyapunov dada por $V^{\cdot}$ (t, x, y) = $\frac{x^2+y^2}{2+\sin(t)}$. Note que V é periódica com o mesmo período do sistema. A derivada de V ao longo das soluções é dada por:

$$\begin{aligned}\dot{V}(t,x,y) &= \frac{-2(x^2+y^2)(2+\sin t)-(x^2+y^2)\cos t}{(2+\sin t)^2}\\ &= -\frac{(4+2\sin t+\cos t)}{(2+\sin t)^2}\cdot(x^2+y^2)\\ &\leq 0, \forall t \geq 0, \forall x, y.\end{aligned}$$

Como V (t, x, y) ≤ x_2 +y_2 e V (t, x, y) ≥ $\frac{x^2+y^2}{3}$ então V é localmente definida positiva e a deri- vada de V é semi-definida negativa, satisfazendo as condições do Teorema 4.1. A função V é radialmente ilimitada e portanto os conjuntos S(L) e A(L) são limitados para qualquer L > 0. Por- tanto, todas as condições do Teorema 4.1 estão satisfeitas e todas as soluções deste sistema ten- dem, para o maior conjunto invariante B contido em E := {(x, y) ∈ S(L) : ∃t ≥ 0; (x, y) = (0, 0)}. Consequentemente todas as soluções tendem para a origem quando t → +∞, ou seja, a origem é um ponto de equilíbrio globalmente atrativo.

4.2 Extensão do Princípio de Invariância de La Salle para Sistemas Periódicos

Nesta seção, uma extensão do princípio de invariância é demonstrada. A principal característica desta extensão é a possibilidade da derivada da função escalar auxiliar V assumir valores positivos em algumas regiões limitadas do espaço de estados. Esta característica simplifica, de certo modo, a busca pela função V e permite que problemas que não podiam ser tratados com o princípio de invariância, seja pela não existência de uma função escalar V ou pela dificuldade em exibí-la, passem a ser possíveis de serem tratados com este resultado.

Teorema 4.2 (Extensão do Princípio de Invariância de LaSalle para Sistemas Periódicos)

Suponha que o sistema (1) seja periódico e V : R × R^n → R^n seja uma função de classe C^1 tal que V seja periódica e com o mesmo pe- riodo do sistema (1). Seja L ∈ R uma cons- tante real, e considere os conjuntos S(L) e A(L) e suponha que S(L) seja limitado. Seja C ⊇ {x ∈ S(L) : ∃t ≥ 0, $\dot{V}$(t, x) > 0} e admita que $\sup_{(t,x)\in[0,T]\times C}$ V (t, x) = l < L. Defina S(l) := {x ∈ S(L) : ∃t ≥ 0, V (t, x) ≤ l}, A(l) := {x ∈ A(L) : V (t, x) < l, ∀t ≥ 0} e E : = {x ∈ S(L) : ∃t ≥ 0 tal que $V^{\cdot}$ (t, x) = 0} ∪ S(l). Seja B o maior conjunto invariante contido em E. Então,

- x_0 ∈ A(L) ⇒ d(s(t, t_0, x_0), B) → 0 quando t → ∞ para todo t0 ∈ R;
- x_0 ∈ S(L) ⇒ ∃t_0 tal que d(s(t, t_0, x_0), B) → 0 quando t → ∞;
- x_0 ∈ A(l) ⇒ s(t, t_0, x_0) tende para o maior conjunto invariante contido em S(l) para todo t_0 ∈ R;

- $x_0 \in S(l) \Rightarrow \exists t_0$ tal que $s(t, t_0, x_0)$ tende para o maior conjunto invariante contido em $S(l)$.

Demonstração.

Sejam $s(t, t_0, x_0)$ a solução da equação diferencial com condição inicial (t_0, x_0) e $t+ > t = 0$ o máximo tempo de existência da solução s.

Seja $x_0 \in A(l)$. Então $V(t, x_0) < l$, $\forall t \geq 0$. Mostraremos que $s(t, t_0, x_0) \in S(l)$, $\forall t \in [t_0, t+)$. De fato, suponha por contradição que $\exists t* > t0$ tal que $s(t*, t_0, x_0) \notin S(l)$, o que implica em $V(t*, s(t*, t_0, x_0) > l$. Entao existe $t_1 \in [t_0, t*)$ tal que $V(t_1, s(t_1, t_0, x_0)) = l$ e $V(t, s(t, t_0, x_0)) > l$ para $t \in (t_1, t*)$. Assim, $\exists \tilde{t} \in (t_1, t*)$ tal que $\dot{V}(\tilde{t}, x) > 0$. Sabemos que $s(t, t_0, x_0) \notin A(l)$, $\forall t \in (t_1, t*)$ e, além disso $C \subset A(l)$, o que nos leva a uma contradição, pois $\dot{V} \leq 0$ neste intervalo.

Como $s(t, t_0, x_0) \in S(l) \subset S(L)$, $\forall t \geq t0$ e $S(L)$ é limitado, Então $S(l)$ é limitado $\forall t \geq t_0$, implicando em $t+ = +\infty$. Logo a solução pertence a $S(l)$, para $t \geq t0$.

Portanto, pelo Lema 2.2, o conjunto ω-limite $\omega(t0, x0)$ é não vazio e a solução se aproxima dele quando $t \to +\infty$. Por outro lado, o conjunto $\omega(t0, x0)$ é um conjunto invariante e $\omega(t_0, x_0) \subset S(l)$, então concluímos que a solução se aproxima do maior conjunto invariante contido em $S(l)$ quando $t \to +\infty$. Isto prova a terceira afirmação do teorema. A quarta afirmação pode ser provada de maneira análoga e portanto sua Demonstração ser´a omitida.

Considere $x_0 \in A(L) - A(l)$. Do Lema 3.4, temos que a solução $s(t, t_0, x_0) \in S(L)$, $\forall t \in [t_0, t_+)$.

Assim, pelos fatos de $s(t, t_0, x_0) \in S(L)$ $\forall t \geq t_0$ e $S(L)$ ser um conjunto limitado, conclui-se que $t_+ = +\infty$ e a solução pertence a $S(L)$ para $t \geq t_0$.

Portanto, pelo Lema 2.2 temos que $\omega(t0, x0) /= \emptyset$ e a solução tende para ele quando $t \to +\infty$.

Suponha que $s(t, t_0, x_0) \in/ C$, $\forall t \geq t$. Então $\dot{V}(t, s(t, t_0, x_0)) \leq 0$, $\forall t \geq t_0$, ou seja V é decres- cente e Então $V(t, s(t, t_0, x_0)) \leq V(t_0, x_0) < L$. Por hipótese temos que V é contínua e periódica em t e, por $S(L)$ ser limitado, então V é limitada, em particular, inferiormente limitada para $t \geq t_0$, o que implica em $V \to \alpha \in R$ quando $t \to \infty$.

Seja $p \in \omega(t_0, x_0)$. Então existe uma sequência $\{t_i\}$, $t_i \to \infty$ tal que $s(t_i, t_0, x_0) \to p$. Para cada i, encontra-se $k_i \in Z$ tal que $t_i + k_i T \in [0, T)$. Então a sequência $\{\tau_i\} = \{t_i - k_i T\}$ é limitada, e portanto admite uma subsequência convergente. Escolha tal subsequência $\{\tau'_i\} = \{t'_i - k T\}$ e enumere mais uma vez como $\{\tau_i\}$. Seja $\tau \in [0, T)$ seu limite.

$V(t'_i, s(t'_i, t_0, x_0)) = V(\tau'_i + k_i T, s(t'_i, t_0, x_0)) \overset{\text{period. de V}}{=} V(\tau'_i, s, (t'_i, t_0, x_0))$ onde $t'_i = k'_i T$. Conclui-se portanto que $\alpha + \lim_{i\to\infty} V(t'_i, s, (t'_i, t_0, x_0)) = \lim_{i\to\infty} V(\tau'_i, s, (t'_i, t_0, x_0)) \overset{\text{cont.. de V}}{=} V(\tau, p)$.

Vamos mostrar que $V(u, s(u, \tau, p)) = \alpha$, $\forall u \in R$. De fato, da Demonstração do Lema 2.3, temos que $s(u + k_i T, t_0, x_0) \to s(u, \tau, p)$ quando $i \to \infty$. Logo, $\alpha = \lim_{i\to\infty} V(u + k_i T, s(u + k_i T, t_0, x_0)) = \lim_{i\to\infty} V(u, s(u + k_i T, t_0, x_0)) = V(u, s(u, \tau, p))$. Pela invariância de $\omega(t_0, x_0)$ temos que $s(t, \tau, p) \in \omega(t_0, x_0)$, $\forall t$. Logo $V(t, s(t, \tau, p)) = \alpha$, $\forall t \Rightarrow \dot{V}(\tau, p) = 0$. Portanto, para cada $p \in \omega(t_0, x_0)$ existe tempo τ tal que $\dot{V}(\tau, p) = 0$.

Portanto, podemos dizer que $p \in E$, logo $\omega(t_0, x_0) \subseteq E$, e por $\omega(t_0, x_0)$ ser um conjunto invariante, segue que $\omega(t_0, x_0) \subseteq B$. Portanto, $s(t, t_0, x_0) \to \omega(t_0, x_0) \subseteq B$ quando $t \to \infty$.

Por fim, suponha que $s(t, t_0, x_0) \in C$ para algum $t \geq 0$. Então $x_0 \in A(l)$, e para este caso já provamos acima que $d(s(t, t_0, x_0), B) \to 0$ quando $t \to \infty$. Portanto, provamos a primeira afirmação do teorema.

Para provar a segunda afirmação, considere $x_0 \in S(L)$. Pelo Lema 3.3, temos que existe t_0 tal que $s(t, t_0, x_0) \in S(L)$, $\forall t \in [t_0, \omega_p)$, onde ωp é o tempo maximal de existência da solução s.

Como S(L) é limitado, $\omega p = +\infty$ e a solução $s(t, t_0, x_0)$ existe e é limitada para todo $t \geq t_0$. De maneira an´aloga ao caso em que $x_0 \in A(L)-A(l)$, prova-se a segunda afirmação do teorema.

A Figura 2 ilustra o Teorema 4.2.

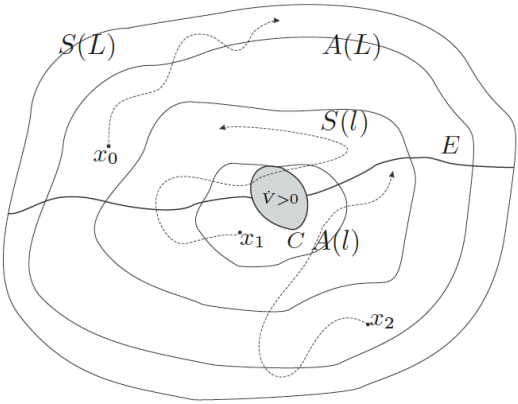


Figura 2: Interpretação geométrica da extensão do princípio de invariância de LaSalle para Sistemas Periódicos.

O exemplo a seguir ilustra os resultados do Teorema 4.2.

Exemplo 4.3 Considere o sistema não linear e periódico descrito pela equação diferencial:

$$\begin{cases} \dot{x} = -x(x^2 + y^2 - 1) + y(2 + \sin(t)) \\ \dot{y} = -x(2 + \sin(t)) - y(x^2 + y^2 - 1) \end{cases}$$

Solução. Seja V a função de Lyapunov dada por V(t,x y) = $\frac{x^2 + y^2}{2 + \sin(t)}$. Note que V é periódica com o mesmo período do sistema. Calculando a derivada de V obtemos a seguinte expressão:

$$\dot{V}(t, x, y) \quad = \quad -\frac{(x^2 + y^2)}{(2 + \sin t)^2} \cdot M(t, x, y),$$

onde M (t, x, y) = [(x2 + y2 – 1)(4 + 2 sin(t)) + cos(t)].

O sinal de M define a região onde a derivada de V é positiva. Desta forma, podemos definir o conjunto C da seguinta maneira: C := {(x, y) ∈ S(L) : $x^2 + y^2 < \frac{7}{6}$}.

Como V = $\frac{x^2+y^2}{2+\sin(t)}$ ≤ $x^2 + y^2$ então $\sup_{(t,x)\in[0,T]\times C}$ V ≤ $\sup_{(t,x)\in[0,T]\times C}$ (x_2 +y_2) e daí l = $\sup_{(t,x)\in[0,T]\times C}$ V = 7 < L.

Sendo assim, temos S(l) := {(x, y) ∈ S(L): $x_2 + y_2 \leq \frac{7}{6}$}, A(l): = {(x, y) ∈ A(L) : $x^2 + y^2 < \frac{7}{6}$, ∀t ≥ 0} e E:= {(x, y) ∈ S(L) : (x, y) = (0, 0)} ∪ S(l) = {(x, y) ∈ S(L) : x2 + y2 ≤ $\frac{7}{6}$}.

Portanto, pelo Teorema 4.2 podemos concluir que a solução tende para o maior conjunto invariante contido em S(l) e S(l) é uma estimativa do atrator global. A Figura 3 ilustra este atrator.

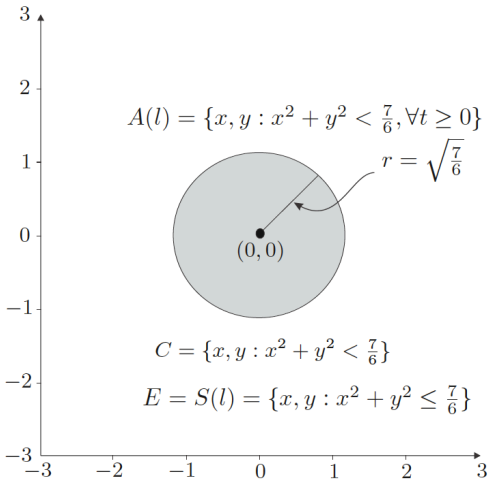


Figura 3: Representação geométrica do Exemplo 4.3.

No exemplo a seguir, aplicamos a extensão do Princípio de Invariância para sistemas periodicos para obter uma estimativa do atrator do sistema de Duffing forçado.

Exemplo 4.4 Considere o sistema dinâmico não linear e periódico descrito por

$$M\ddot{z} + K_c\dot{z} + K_m z + k_m\rho^2 z^3 = k_u \cos(\omega t);$$

fazendo x = z e y = $\dot{z}$, e escolhendo $k_m/M = 3$, $k_c/M = 3$, $k_m\rho^2/M = 0.1$, $k_u/M = 2$ e ω = 1, temos a seguinte equação diferencial:

$$\begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = -3y - 3x - 0.1x^3 + 2\cos(t) \end{cases}$$

Solução. Seja V a função de Lyapunov dada por V (t, x, y) = ($9.2804x^2$ + 2.5368xy + $1.0069y^2$). Note que V é periódica com o mesmo período do sistema.

Desta forma, temos que $\dot{V}$= [4.909xy + (5.0736x+4.0276y) cos(t)−(7.6104x2 +3.5046y2 + 0.20138x3y + 0.25368x4)]

Assim, definimos o conjunto C:= {(x, y) ∈ S(L) : [4.909xy + (5.0736|x| + 4.0276|y|) − (7.6104x2 +3.5046y2 +0.20138x3y +0.25368x4)] > 0}.

Usando o Software Mathematica, temos que valor o m´aximo da função V em C é aproximada- mente 23.7297 em (x, y) ≈ (1.27462, 1.73666).

Logo, $\overline{A(l)} = S(l) := \{x, y \in R^n : 9.2804x^2 + 2.5368xy + 1.0069y^2 \leq 23.7297\}$ e E := {(x, y) ∈ S(L) : ∃t ≥ 0; V˙ = 0} ∪ S(l) = S(l). Portanto, usando o Teorema 4.2, temos que a solução tende para o maior conjunto invariante contido em S(l) e S(l) é uma estimativa do atrator global.

De maneira ilustrativa, a Figura 4 representa o Exemplo 4.4.

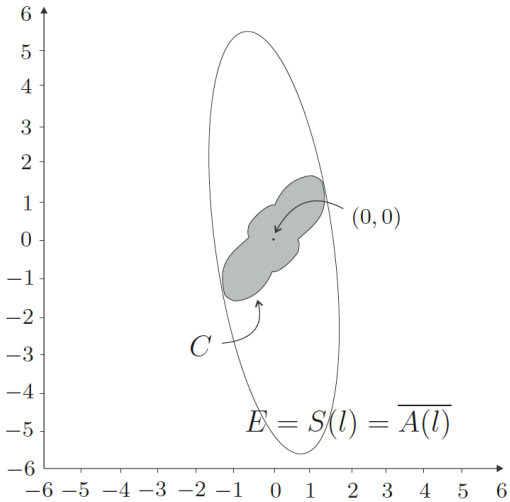


Figura 4: Representaçãoo geométrica do Exemplo 4.4.

CONCLUSÕES

Neste trabalho, uma extensão do princípio de invariância para a classe de sistemas periódicos foi demonstrada. A principal característica desta extensão é a possibilidade da derivada da função escalar auxiliar, muitas vezes chamada de função de Lyapunov, assumir valores positivos em alguns conjuntos limitados. Relaxando a condição da derivada ser semi-definida negativa no princípio de invariância, simplifica de certa forma, a busca pela função auxiliar. Como consequência, uma classe maior de sistemas dinâmicos periódicos podem ser tratados com esta teoria. A extensão do princípio de invariância foi útil para obtermos estimativas de atratores de sistemas dinâmicos periódicos e com comportamento complexo, como é o caso do oscilador forçado de Duffing, que exibe comportamento caótico.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a todos amigos do laboratório LACO/USP/EESC que ajudaram na parte com- putacional e ao CNPq.

REFERÊNCIAS

Alberto, L. F. C., Calliero, T. R., Martins, A. C. P. and Bretas, N. G. (2007). An Invariance Principle for Nonlinear Discrete Autonomous Dynamical Systems, IEEE Transactions on Automatic Control, v. 52, p. 692-697.

Bacciotti, A; Mazzi, L. (2005). An invariance principle for nonlinear switched systems, Sys- tems and Control Letters, 54 (11) 1109-1119.

Bretas, N. G., London JR, J. B. A., Alberto, L. F. C. and Bretas, A. S. (2005). A topological approach to the identification of critical measurements in power-system state estimation, IEEE Transactions on Circuits and Systems. I, Fundamental Theory and Applications, USA, v. 52, n.1, p. 139-147.

Bretas, Newton Geraldo; Alberto, L. F. C. (2003). Lyapunov Function for Power System with Transfer Conductances: Extension of the Invariance Principle, IEEE Transactions on Power Systems, USA, v. 18, n.2, p. 769-777.

Hale, J. K. (1969). Dynamical systems and stability, J. Math. Anal. and Appl, 26: 39- 59.

Hale, J. K; Lunel, S. V. (1993). Introduction to Functional Differential Equations, Springer- Verlag, Applied Mathematical Sciences, Vol 99.

Hespanha, J. P. (2004). Uniform stability of switched linear systems: Extensions of LaSalle´s invariance principle, IEEE Tran- sactions on Automatic Control, 49 (4) 470-482.

LaSalle, J. P. (1962). Asymptotic stability criteria, Proceedings of Symposia in Applied Mathe- matics, Hydrodynamic Instability, AMS 13: 299-307.

LaSalle, J. P. (1977). Stability theory for difference equations. studies in ordinary differencial equation, Studies in ordinary dif- ferencial equations, Stud. in Math., Math. Assoc. of America, Washington, D. C. (Re- viewer G.R.Sell) 14: 1-31.

Mijolaro, A. P., Alberto, L. F. C. and Bretas, N. G. (2010). Synchronization of a Class of Second-Order Nonlinear Systems, Interna- tional Journal of Bifurcation and Chaos in Applied Sciences and Engineering, v. 18, p. 3461-3471.

Miller, R. K. (1965). Assymptotic behavior os solutions of nonlinear differential equations, Transactions of the American Mathematical Society, 115(3): 400-416.

Rabelo, Marcos ; Alberto, L. F. C. (2010). An Extension of the Invariance Principle for a Class of Differential Equations with Finite Delay, Advances in Difference Equations, v. 2010, p. 1-14.

Rodrigues, H. M. (1970). Invarian´ca para sistemas não autônomos de Equações diferenciais com retardamento e aplica¸c˜oes, Tese de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.

Rodrigues, H. M., Alberto, L. F. C. and Bre- tas, N. G. (2000). On the Invariance Principle. Generalizations and Applications to Synchronism, IEEE Transactions on Cir- cuits and Systems. I, Fundamental Theory and Applications, U.S.A., v. 47, n.5, p. 730- 739.

Sell, G. (1967). Nonautonomous differential equations and topological dynamics, i, ii, Trans. Amer. Math. Soc. 127: (I)241-262 (II)263-283.

Shevitz, D; Paden, B. (1994). Lyapunov stability theory of nonsmooth systems, IEEE Tran- sactions on Automatic Control, 39 (9) 1910-1914.

Silva, F. H. J. R. d., Alberto, L. F. C., London JR, J. B. A. and Bretas, N. G. (2005). Smooth perturbation on a classical energy function for lossy power system stability analysis, IEEE Transactions on Circuits and Systems. I, Fundamental Theory and Appli- cations, USA, v. 52, n.1, p. 222-229.

Slemrod, M. (1970). Asymptotic behavior of a class of abstract dynamical systems, J. Diff. Equations, 7(3): 584-600.

Valentino, M. C., Oliveira, V. A., Alberto, L. F. C. and Azevedo, D. S. (2012). An extension of the invariance principle for dwell-time switched nonlinear systems, IEEE Transacti- ons on Circuits and Systems. I, Fundamental Theory and Applications, USA, v. 52, n.1, p. 222-229.

Vidyasagar, M. (1993). Nonlinear Systems Analysis, PRENTICE HALL, Englewood Cliffs, New Jersey - Second Edition.

CAPÍTULO 5

TÉCNICAS DA ÁREA DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL, COM INTELIGENCIA ARTIFICIAL, EM ESPECIAL CHATGPT UTILIZADAS COMO FERRAMENTA DE APOIO NO ENSINO UNIVERSITÁRIO NA DISCIPLINA DE ROBÓTICA

Data de aceite: 03/07/2023

Márcio Mendonça
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
PPGEM-CP - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica PP/CP
http://lattes.cnpq.br/5415046018018708

Matheus Gil Bovolenta
Acadêmico - Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE). Cornélio Procópio
http://lattes.cnpq.br/1518815195539638

Francisco de Assis Scannavino Junior
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE). Cornélio Procópio
http://lattes.cnpq.br/4513330681918118

Lucas Botoni de Souza
Universidade Tecnológica Federal do Paraná. PPGEM-CP - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica CP
Cornélio Procópio
http://lattes.cnpq.br/5938489268359300

Gustavo Henrique Bazan
Instituto Federal do Paraná, Campus Jacarezinho
Jacarezinho
http://lattes.cnpq.br/7076940949764767

Marcos Antônio de Matos Laia
Departamento de Ciência da Computação – UFSJ
Minas Gerais - MG
http://lattes.cnpq.br/7114274011978868

Renato Augusto Pereira Lima
Inspetor Chefe CREA Regional Londrina
Cornélio Procópio
http://lattes.cnpq.br/3518337122740114

Bruno Oliveira Rosa
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Acadêmico - Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE)
Cornélio Procópio
http://lattes.cnpq.br/5010826876808074

Luiz Francisco Sanches Buzachero
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE)
Cornélio Procópio
http://lattes.cnpq.br/1747856636744006

Rodrigo Rodrigues Sumar
Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE)
Cornélio Procópio
http://lattes.cnpq.br/1461760661483683

Vera Adriana Huang Azevedo Hypólito
Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
Etec Jacinto Ferreira de Sá –
Ourinhos - SP
http://lattes.cnpq.br/6169590836932698

João Maurício Hypólito
Centro Paula Souza Faculdade de Tecnologia (FATEC)
Departamento Computação-
Ourinhos - SP
http://lattes.cnpq.br/5499911577564060

Fabio Nogueira de Queiroz
Centro Paula Souza Faculdade de Tecnologia (FATEC)
Departamento Computação - Tatuí - SP
http://lattes.cnpq.br/4466493001956276

Henrique Cavalieri Agonilha
Universidade Filadélfia (Unifil)
Acadêmico Engenharia da Computação
Londrina - PR
http://lattes.cnpq.br/9845468923141329

Emanuel Ignacio Garcia
Acadêmico - Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE)
Cornélio Procópio
http://lattes.cnpq.br/8501809850590859

RESUMO: As técnicas da área de inteligência artificial, como aprendizado de máquinas, algoritmos evolutivos e lógica fuzzy, são amplamente utilizadas como ferramentas de apoio no ensino universitário. O aprendizado de máquinas é uma técnica que permite que um sistema aprenda a partir de dados e melhore seu desempenho ao longo do tempo. Os algoritmos evolutivos são usados para encontrar soluções ótimas para problemas complexos, usando princípios inspirados na evolução biológica. A lógica fuzzy é uma técnica que permite lidar com situações em que as informações são vagas ou incertas. Essas técnicas são usadas em diversas áreas do ensino universitário, como engenharia, ciência da computação, matemática e estatística, para auxiliar no ensino de conceitos complexos e no desenvolvimento de soluções inovadoras para problemas do mundo real. Esse trabalho se encerra com uma conclusão e sugere futuros trabalhos.
PALAVRAS-CHAVE: Sistemas Computacionais Inteligentes, Soluções Problemas, Ensino Universitário, Robótica.

TECHNIQUES FROM THE ARTIFICIAL INTELLIGENCE FIELD, SUCH AS MACHINE LEARNING, EVOLUTIONARY ALGORITHMS, AND FUZZY LOGIC, USED AS SUPPORT TOOLS IN UNIVERSITY TEACHING.

ABSTRACT: Techniques in the field of Artificial Intelligence, such as Machine Learning, Evolutionary Algorithms, and Fuzzy Logic, are widely used as support tools in university education. Machine Learning is a technique that allows a system to learn from data and improve its performance over time. Evolutionary Algorithms are used to find optimal solutions for complex problems using principles inspired by biological evolution. Fuzzy Logic is a technique that allows dealing with situations where information is vague or uncertain. These techniques are used in various areas of university education, such as engineering, computer science, mathematics, and statistics, to assist in teaching complex concepts and developing innovative solutions for real-world problems. This study concludes with a summary and suggestions for further research.

KEYWORDS: Intelligent computing systems, problem-solving solutions, university education, Robotics.

1 I INTRODUÇÃO

A área de inteligência artificial tem sido objeto de grande interesse nos últimos anos, tanto em termos de pesquisa quanto de aplicação prática (RUSSELL; NORVIG, 2016). As técnicas da área, como o aprendizado de máquinas, os algoritmos evolutivos e a lógica fuzzy, têm sido cada vez mais utilizadas como ferramentas de apoio em diferentes áreas do conhecimento, incluindo o ensino universitário (MITROVIC; WEERASINGHE, 2009).

No contexto do ensino universitário, as técnicas de inteligência artificial têm sido utilizadas em diversas áreas, desde a educação à distância até o desenvolvimento de sistemas de tutoria inteligente (MITROVIC; WEERASINGHE, 2009). Segundo Mitrovic e Weerasinghe (2009, p. 1), “a inteligência artificial pode ser uma ferramenta útil para apoiar o ensino universitário, ajudando a tornar o processo de aprendizagem mais eficiente e eficaz”.

Entre as técnicas de inteligência artificial utilizadas como ferramentas de apoio no ensino universitário, destacam-se o aprendizado de máquinas, os algoritmos evolutivos e a lógica fuzzy (MITROVIC; WEERASINGHE, 2009). O aprendizado de máquinas, por exemplo, é utilizado para criar sistemas que possam aprender com dados e tomar decisões com base nessas informações. Já os algoritmos evolutivos são utilizados para encontrar soluções ótimas para problemas complexos, enquanto a lógica fuzzy é utilizada para lidar com incertezas e imprecisões nos dados.

Diante do exposto, é possível afirmar que as técnicas da área de inteligência artificial têm um grande potencial como ferramentas de apoio no ensino universitário, contribuindo para tornar o processo de aprendizagem mais eficiente e eficaz (MITROVIC; WEERASINGHE, 2009).

Com a evolução da tecnologia e a crescente utilização de ferramentas digitais, o uso de chatbots como ferramenta de apoio no ensino universitário tem se tornado cada

vez mais comum (OPENAI, 2023). O *ChatGPT*, por exemplo, pode ser utilizado como uma possível ferramenta para aprendizado universitário.

ChatGPT (sigla em inglês para Generative Pre-trained Transformer, ou em português, Transformador Pré-treinado de Gerador de Conversas é um assistente virtual inteligente no formato chatbot online, dotado de inteligência artificial, desenvolvido pela OpenAI. Especializado em diálogos, foi lançado em novembro de 2022. O chatbot é baseado em um modelo de linguagem ajustado por meio de técnicas de aprendizado supervisionado e por reforço, tendo como modelo básico o GPT-3.5 da OpenAI, uma versão aprimorada do GPT-3. Em 15 de março de 2023, o GPT-4 foi lançado exclusivamente para os usuários do *ChatGPT* Plus.

O *ChatGPT*, enquanto protótipo de inteligência artificial, chamou a atenção por suas respostas detalhadas e articuladas. Contudo, a precisão de suas informações foi alvo de críticas. Conforme o New York Times, o entusiasmo em torno da aplicação da tecnologia da OpenAI lembrou outros momentos que "transformaram o Vale do Silício, desde a chegada do primeiro iPhone e do mecanismo de busca Google até a introdução do navegador Netscape, que pavimentou o caminho para a comercialização da internet" (NEW YORK TIMES, 2023). Bill Gates, da Microsoft, acredita que o *ChatGPT* tem potencial para mudar o mundo: "Até agora, a inteligência artificial podia ler e escrever, mas não conseguia entender o conteúdo. Os novos programas, como o *ChatGPT*, vão tornar muitos trabalhos de escritório mais eficientes. Isso vai mudar o nosso mundo"

Uma das principais vantagens do uso de chatbots como o *ChatGPT* é a sua disponibilidade 24 horas por dia, 7 dias por semana. Isso significa que os estudantes podem ter acesso a uma fonte de informações e esclarecimentos de dúvidas a qualquer hora, sem precisar esperar por horários específicos ou pela disponibilidade de um professor ou tutor.

Além disso, o *ChatGPT* é capaz de fornecer respostas rápidas e precisas para uma ampla gama de perguntas e assuntos relacionados a diferentes áreas do conhecimento. Ele pode ajudar os estudantes a compreender conceitos e teorias complexas, fornecer exemplos práticos e até mesmo fornecer orientações para a resolução de problemas.

Outra vantagem do uso do *ChatGPT* como ferramenta de apoio no ensino universitário é a sua capacidade de adaptar-se às necessidades individuais de cada estudante. Ele pode fornecer feedbacks personalizados com base nas respostas do aluno e ajustar a abordagem de ensino para atender às necessidades específicas de cada estudante.

Em resumo, o *ChatGPT* pode ser uma ferramenta eficaz de apoio no ensino universitário, permitindo que os estudantes tenham acesso a informações e esclarecimentos de dúvidas a qualquer hora, além de fornecer feedbacks personalizados e adaptar-se às necessidades individuais de cada aluno. No entanto, é importante utilizar o *chatbot* de forma complementar e não substituta à interação presencial com professores e colegas de turma.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: na seção 2, fundamentos de tópicos circunscritos a pesquisa, como por exemplo a cinemática. Já a seção 3 apresenta alguns detalhes da construção do protótipo incluindo alguns detalhes de visão robótica e sobre o cenário empregados para os experimentos. A seção 4 apresenta uma discussão dos resultados obtidos. E, finalmente, a seção 5, conclui e endereça futuros trabalhos.

2 | FUNDAMENTOS

Essa seção objetiva apresentar a importância das ferramentas computacionais inteligentes na robótica.

Entretanto, é importante ressaltar a importância dos experimentos simulados, porque o *ChatGPT* quando não desenvolve um código completo, se aproxima muito auxiliando a docência.

Os experimentos simulados no ensino são uma ferramenta pedagógica que tem ganhado cada vez mais relevância no campo da educação. Eles permitem aos alunos vivenciar e aprender conceitos científicos de forma interativa e segura, o que potencializa o engajamento e a compreensão dos conteúdos abordados (RUTHERFORD, 2014). Ao longo deste texto, serão discutidas as principais vantagens dos experimentos simulados no ensino e algumas referências relevantes no formato ABNT.

Segundo Finkelstein et al. (2005), o uso de simulações no ensino pode promover o desenvolvimento do pensamento crítico e aprimorar habilidades de resolução de problemas, à medida que os alunos exploram diferentes cenários e hipóteses. Além disso, experimentos simulados podem contribuir para a inclusão de estudantes com necessidades especiais, já que permitem adaptações e customizações conforme as demandas específicas de cada aluno (WINDSOR & WINDSOR, 2011).

Os experimentos simulados também apresentam vantagens práticas, como a redução de custos com materiais e a diminuição dos riscos associados a experimentos reais, como o manuseio de substâncias tóxicas ou a exposição a situações perigosas (SUN et al., 2008). Isso torna a aprendizagem mais acessível e segura, sem comprometer a qualidade do ensino (RODRIGUEZ & NERCESSIAN, 2012).

Por fim, é importante destacar que o uso de simulações no ensino deve ser integrado a outros métodos pedagógicos, de modo a proporcionar uma aprendizagem significativa e complementar aos estudantes (HÄMÄLÄINEN et al., 2011).

2.1 Sistemas computacionais inteligentes

A robótica tem se tornado cada vez mais presente em nossas vidas, graças ao avanço da tecnologia. A utilização de sistemas computacionais inteligentes aplicados em robótica tem possibilitado a criação de robôs capazes de realizar tarefas complexas, como navegação autônoma, reconhecimento de voz e de objetos, e interação com humanos.

Nesse sentido, é importante destacar alguns exemplos que demonstram a aplicação desses sistemas na robótica.

Um exemplo de sistema computacional inteligente aplicado em robótica é o sistema de visão computacional. Segundo Alves (2018), este sistema permite que um robô seja capaz de identificar objetos e pessoas no ambiente em que está inserido, por meio do processamento de imagens capturadas por câmeras. Esse tipo de sistema pode ser utilizado em diversos contextos, como na indústria e na área da saúde, por exemplo. Um exemplo é o uso de robôs cirúrgicos, que utilizam sistemas de visão computacional para auxiliar cirurgiões durante procedimentos minimamente invasivos.

Outro exemplo de sistema computacional inteligente aplicado em robótica é o sistema de aprendizado de máquina. De acordo com Ribeiro (2018), esse sistema permite que um robô possa aprender com base em exemplos fornecidos pelos usuários ou por outros sistemas, sem a necessidade de ser programado explicitamente para realizar uma tarefa específica. Isso possibilita que o robô possa se adaptar a diferentes situações e ambientes, tornando-o mais flexível e eficiente. Um exemplo é o uso de robôs em linhas de produção, que utilizam sistemas de aprendizado de máquina para se adaptar a diferentes tipos de produtos e processos [4].

Em resumo, a utilização de sistemas computacionais inteligentes aplicados em robótica tem possibilitado a criação de robôs cada vez mais autônomos e capazes de interagir de forma mais natural com os usuários. Esses sistemas permitem que os robôs possam realizar tarefas complexas, como navegação autônoma e reconhecimento de voz e de objetos, de forma eficiente e flexível. Com isso, a robótica tem se tornado cada vez mais presente em nossas vidas, podendo ser utilizada em diferentes áreas, como na indústria, na saúde e na educação.

3 | DESENVOLVIMENTO

Ao usar a IA *ChatGPT*, como o modelo desenvolvido pela OpenAI (MARCUS, 2020), para desenvolvimento de códigos, textos e listas de questões no contexto da robótica, você pode aproveitar o poder do processamento de linguagem natural (NLP) e a capacidade da IA de gerar informações relevantes e úteis (BROWN et al., 2020). Aqui estão algumas dicas sobre como abordar cada aspecto:

Desenvolvimento de códigos:

ChatGPT pode auxiliar na geração de exemplos de código ou fornecer soluções para problemas específicos de codificação (NGUYEN, 2019). Você pode pedir sugestões de código ou soluções para problemas relacionados à robótica. No entanto, lembre-se de que *ChatGPT* é um modelo de linguagem e pode não ser perfeito ao gerar códigos complexos (VASWANI et al., 2017). Ao receber sugestões de código da IA, certifique-se de revisar e adaptar as soluções conforme necessário.

Desenvolvimento de textos:

Ao escrever textos sobre robótica, você pode usar *ChatGPT* para gerar trechos informativos, ideias e exemplos (RAFFEL et al., 2020). A IA pode ajudá-lo a criar parágrafos explicativos, introduções, conclusões e até mesmo revisar e aprimorar seu texto atual. Ao usar a IA para escrever, lembre-se de verificar a precisão das informações e adaptar o conteúdo às suas necessidades específicas.

Lista de questões:

ChatGPT pode ajudá-lo a criar listas de questões sobre temas específicos relacionados à robótica (SICILIANO & KHALED, 2016). Por exemplo, você pode pedir à IA para gerar perguntas sobre programação de robôs, sensores, atuadores ou aplicações práticas. Essas listas de questões podem ser úteis para testar seus conhecimentos, criar materiais de estudo ou conduzir discussões em grupo.

Ao utilizar o *ChatGPT* no contexto da robótica, é importante lembrar que a IA é uma ferramenta para auxiliar e complementar seu trabalho (RUSSELL & NORVIG, 2016). Sempre revise e verifique as informações geradas pela IA e adapte-as conforme necessário. A combinação de sua expertise e a capacidade de geração de conteúdo do *ChatGPT* pode resultar em materiais de alta qualidade e informativos na área de robótica.

4 I RESULTADOS

A simulação em robótica é uma técnica amplamente utilizada para testar algoritmos, estratégias de controle, programação de movimento, entre outras aplicações, antes de implantá-los em robôs reais. Essa técnica pode ser realizada em diferentes tipos de ambientes, como simulações em computador, testes em bancadas de laboratório ou em ambientes externos Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R., & Scaramuzza, D. (2021).

Existem diversos softwares de simulação de robôs disponíveis no mercado, como o Gazebo, V-REP, ROS, entre outros. Esses softwares permitem a criação de modelos virtuais de robôs e a simulação de suas interações com o ambiente em que estão inseridos. Além disso, permitem a programação de movimentos e a execução de tarefas específicas.

Uma das vantagens da simulação em robótica é a possibilidade de testar diferentes cenários e condições em um ambiente controlado e seguro. Além disso, a simulação pode ser utilizada para treinar algoritmos de aprendizado de máquina e redes neurais, permitindo que o robô aprenda a realizar tarefas complexas de forma autônoma.

O texto entre aspas mostra uma atualização do código do MatLab que utiliza o solve, solução numérica para solução do clássico do problema da cinemática inversa de um robô de duas dimensões, como por exemplo o robô da figura 1. Nesse código à solução está no plano de atuação do ombro e cotovelo do robô, a base por exemplo pode estar no plano paralelo ao da projeção da imagem. Em outras palavras a variável de rotação da base é relaxada.

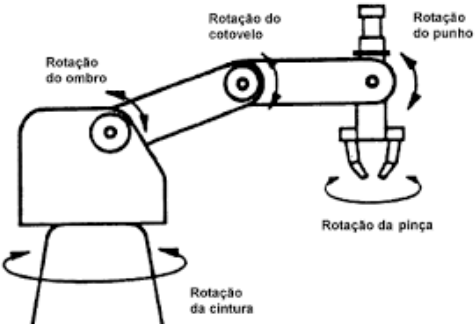


Figura 1–Estrutura de desenvolvimento.

Código atualizado para versões mais recentes do MatLab.

```
"syms a1 a2
eq1 = 0.5*cos(a1) + 0.6*cos(a1+a2) == 0.88;
eq2 = 0.5*sin(a1) + 0.6*sin(a1+a2) == 0.65;
[a1Sol, a2Sol] = solve([eq1, eq2], [a1, a2]);

a1SolRad = double(a1Sol);
a2SolRad = double(a2Sol);
fprintf('Solução 1: a1 = %0.4f rad, a2 = %0.4f rad\n',
a1SolRad(1), a2SolRad(1));
fprintf('Solução 2: a1 = %0.4f rad, a2 = %0.4f rad\n',
a1SolRad(2), a2SolRad(2));"
```

4.1 Aplicação do *chatbot* gerando questões teóricas de robótica

O que é robótica autônoma e qual é o seu objetivo?

Quais são os principais desafios enfrentados na implementação de robôs autônomos?

Quais são os tipos de sensores utilizados em robótica autônoma?

Como os algoritmos de localização e mapeamento simultâneos (SLAM) são utilizados em robótica autônoma?

Quais são as aplicações práticas de robótica autônoma em diferentes setores, como na indústria, na saúde e na agricultura?

Quais são os impactos socioeconômicos da adoção de robôs autônomos na indústria e no mercado de trabalho?

Quais são as principais diferenças entre robôs autônomos e robôs controlados remotamente?

Como os robôs autônomos podem ser programados para realizar tarefas específicas e como o aprendizado de máquina é utilizado nesse processo?

Quais são as principais questões éticas envolvidas no desenvolvimento e uso de robôs autônomos?

Quais são as perspectivas futuras para a robótica autônoma e como ela pode impactar a sociedade no futuro?

O Arduino é uma plataforma de código aberto para prototipagem eletrônica, criada em 2005, que permite a criação de diversos dispositivos eletrônicos, desde projetos simples até robôs controlados por dispositivos móveis. Sua facilidade de uso e vasta comunidade online facilitam o aprendizado e o desenvolvimento de projetos. Para montar um protótipo, são necessários componentes como baterias, ponte H e módulos de comunicação, como o Bluetooth HC-06. A Figura mostra a versão mais básica do mesmo, Arduino UNO.

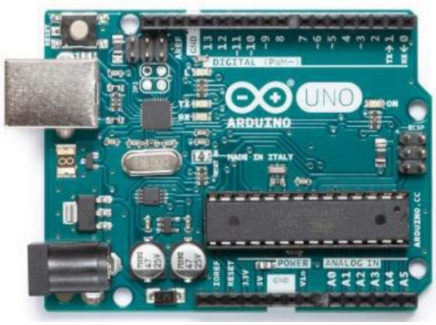


Figura 2: Arduino Uno - microprocessador empregado protótipos

Aqui está um exemplo de código para o Arduino que aciona um servo motor quando um sensor é ativado em uma porta de entrada e desliga quando outro sensor é ativado em uma porta de entrada diferente:

```
#include <Servo.h>
// Definir os pinos dos sensores e do servo motor
const int sensorPin1 = 2;
const int sensorPin2 = 3;
const int servoPin = 9;
// Definir o ângulo inicial do servo motor
const int servoInitialPosition = 0;
const int servoActivatedPosition = 90;
// Criar uma instância do objeto Servo
Servo servo;
void setup() {
  // Inicializar as portas de entrada dos sensores
  pinMode(sensorPin1, INPUT);
  pinMode(sensorPin2, INPUT);
```

```
  // Conectar o servo motor ao pino definido
  servo.attach(servoPin);
  // Definir a posição inicial do servo motor
  servo.write(servoInitialPosition);
}
void loop() {
  // Ler os valores dos sensores
  int sensorValue1 = digitalRead(sensorPin1);
  int sensorValue2 = digitalRead(sensorPin2);
  // Acionar o servo motor se o primeiro sensor for ativado e
desativar se o segundo sensor for ativado
  if (sensorValue1 == HIGH && sensorValue2 == LOW) {
    servo.write(servoActivatedPosition);
  } else if (sensorValue1 == LOW && sensorValue2 == HIGH) {
    servo.write(servoInitialPosition);
  }
  // Aguardar um pouco antes de verificar os sensores novamente
  delay (100);
}
```

Este código utiliza a biblioteca Servo para controlar um servo motor. Ele lê os valores dos sensores conectados aos pinos sensorPin1 e sensorPin2 e aciona o servo motor para a posição *servoActivatedPosition* se o primeiro sensor for ativado e para a posição servoInitialPosition se o segundo sensor for ativado. A função delay é usada para aguardar 100 milissegundos antes de verificar os sensores novamente, evitando a leitura contínua dos sensores e permitindo uma resposta mais suave.

Conceitos teóricos

> "explique porque a física lagrangiana é mais aplicável em robótica do que a newtoniana"

A física lagrangiana é considerada mais aplicável em robótica do que a física newtoniana devido a várias vantagens e características inerentes à formulação lagrangiana (SICILIANO & KHALED, 2016). Aqui estão algumas razões pelas quais a abordagem lagrangiana é preferida na robótica:

1. Generalidade: A formulação lagrangiana é aplicável a sistemas com diferentes tipos de coordenadas generalizadas e não se restringe apenas às coordenadas cartesianas, como a abordagem newtoniana (GOLDBERG, 1980). Essa generalidade permite que a robótica lide com uma variedade maior de sistemas e configurações, incluindo sistemas com restrições complexas.
2. Simplicidade matemática: A abordagem lagrangiana simplifica a matemática envolvida na modelagem e análise de sistemas robóticos (MURRAY et al., 1994).

Ela usa o princípio do mínimo de ação, o que leva a equações de movimento mais compactas e de fácil manipulação. Essa simplicidade matemática é útil na análise de sistemas robóticos com múltiplos graus de liberdade.

3. Facilidade na modelagem de sistemas com múltiplos graus de liberdade: A formulação lagrangiana é particularmente adequada para lidar com sistemas que têm múltiplos graus de liberdade e são interconectados, como é o caso dos manipuladores robóticos (CRAIG, 2005). A abordagem lagrangiana permite a modelagem e análise de tais sistemas de forma eficiente e sistemática, sem se preocupar com forças internas ou restrições complexas.

4. Invariância às transformações de coordenadas: A formulação lagrangiana é invariante às transformações de coordenadas (LANDAU & LIFSHITZ, 1976). Isso significa que, mesmo que as coordenadas sejam alteradas, a forma das equações de movimento permanecerá a mesma. Essa propriedade é útil na robótica, onde frequentemente é necessário mudar de um sistema de coordenadas para outro, por exemplo, do espaço da junta para o espaço do efetuador.

5. Facilidade na inclusão de forças não conservativas: A abordagem lagrangiana também facilita a inclusão de forças não conservativas, como atrito e forças externas, na análise do sistema robótico (LEWIS et al., 2014). Isso é especialmente útil na modelagem de robôs reais, onde forças não conservativas desempenham um papel significativo no desempenho do sistema.

Em resumo, a física lagrangiana é mais aplicável em robótica do que a newtoniana devido à sua generalidade, simplicidade matemática, facilidade na modelagem de sistemas com múltiplos graus de liberdade, invariância às transformações de coordenadas e facilidade na inclusão de forças não conservativas (SICILIANO & KHALED, 2016). Essas características tornam a abordagem lagrangiana uma ferramenta valiosa na análise e controle de sistemas robóticos.

5 I CONCLUSÃO

O uso do *ChatGPT* no ensino de robótica na universidade tem se mostrado uma ferramenta valiosa e eficiente, especialmente no auxílio ao desenvolvimento de códigos em MATLAB e na consolidação dos fundamentos teóricos da área. O emprego dessa tecnologia no processo educacional possibilita uma abordagem personalizada e adaptativa ao aprendizado, favorecendo a compreensão de conceitos complexos e contribuindo para a solução de problemas específicos.

O *ChatGPT* permite aos estudantes explorar ideias e soluções de forma interativa e colaborativa, promovendo a troca de conhecimento e aprimorando habilidades técnicas essenciais na área de robótica. Ao oferecer suporte no desenvolvimento de algoritmos e código em MATLAB, essa tecnologia facilita a aplicação prática dos conceitos teóricos, aumentando a eficácia do aprendizado e preparando melhor os alunos para os desafios da indústria.

Deste modo, a utilização do *ChatGPT* também tem o potencial de otimizar o tempo e esforços dos educadores, permitindo que se concentrem em questões mais complexas e no aprofundamento do ensino. Portanto, a incorporação dessa ferramenta no ensino de robótica na universidade tem um impacto significativo no avanço da área, produzindo profissionais mais bem capacitados e preparados para enfrentar os desafios futuros da área de robótica e automação.

Futuros trabalhos endereçam a coexistência de técnicas de aprendizado de máquina para solução da cinemática inversa, por exemplo.

REFERÊNCIAS

BROWN, T. B. et al. Language Models are Few-Shot Learners. 2020.

CROUZET, B. How Machine Learning is Revolutionizing Manufacturing. Forbes, 2018. Disponível em: https://www.forbes.com/sites/forbestechcouncil/2018/08/22/how-machine-learning-is-revolutionizing-manufacturing/?sh=3a2f1.

FINKELSTEIN, N. D. et al. When learning about the real world is better done virtually: A study of substituting computer simulations for laboratory equipment. Physical Review Special Topics - Physics Education Research, v. 1, n. 1, p. 010103, 2005.

HÄMÄLÄINEN, R. et al. Promoting socially shared regulation of learning in CSCL: Progress of socially shared regulation among high- and low-performing groups. Computers in Human Behavior, v. 27, n. 2, p. 2017-2078, 2011.

MARCUS, G. OpenAI's GPT-3: The State of the Art in AI. 2020.

MITROVIC, A.; WEERASINGHE, A. Using artificial intelligence techniques in university education. In: Proceedings of the 11th International Conference on Intelligent Tutoring Systems. 2009. p. 1-10.

NGUYEN, D. Q. V. Robotics and Artificial Intelligence. 2019.

OPENAI. Introducing ChatGPT. Disponível em: https://openai.com/blog/introducing-*ChatGPT*/. Acesso em: 23 abr. 2023.

OROSCO, R. Robótica e suas aplicações na medicina. Portal Hospitalar, 2020. Disponível em: https://www.portalhospitalar.com.br/robotica-e-suas-aplicacoes-na-medicina/

RAFFEL, C. et al. Exploring the Limits of Transfer Learning with a Unified Text-to-Text Transformer. 2020.

RIBEIRO, R. M. Aprendizado de máquina em robótica. In: Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2019. Anais do Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, [Instituição Organizadora], 2019.

RODRIGUEZ, H.; NERCESSIAN, N. J. Do simulations replace real laboratories in science education? In: Annual Conference of the American Educational Research Association, 2012, Vancouver. Anais... Vancouver: AERA, 2012.

RUSSELL, S. J.; NORVIG, P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. 2016.

RUTHERFORD, J. Experimenting with simulations. The Science Teacher, v. 81, n. 3, p. 34-39, 2014.

SIEGWART, R.; NOURBAKHSH, I. R.; SCARAMUZZA, D. Introduction to Autonomous Robots: Mechanisms, Sensors, Actuators, and Algorithms. Cambridge, Massachusetts, Estados Unidos: MIT Press, 2021.

SUN, D. et al. A review on the integration of virtual reality technology into science education. Journal of Educational Technology Development and Exchange, v. 1, n. 1, p. 1-16, 2008.

WINDSOR, W. T.; WINDSOR, D. M. Virtual environments: Issues and opportunities for developing inclusive educational spaces. Disability and Rehabilitation: Assistive Technology, v. 6, n. 1, p. 63-69, 2011.

SICILIANO, B.; KHALED, O. Springer Handbook of Robotics. 2016.

VASWANI, A. et al. Attention Is All You Need. 2017.

CRAIG, J. J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control. 2005. G

CAPÍTULO 6

A IMPRESSÃO 3D NA PROTOTIPAGEM RÁPIDA DE PRODUTOS INDUSTRIAIS

Data de submissão: 09/06/2023 *Data de aceite: 03/07/2023*

Artur Oliveira Santos
Centro Universitário Estácio de Sergipe
Aracaju – SE
http://lattes.cnpq.br/5201885609727822

João Domingos Covello Carregosa
Centro Universitário Estácio de Sergipe
Aracaju – SE
http://lattes.cnpq.br/0172822246623074

RESUMO: Este trabalho tem como objetivo abordar a evolução da Impressão 3D e seu uso nos processos industriais de prototipagem, viabilizando o tempo de produção, e a criação de produtos de alta complexibilidade geométrica. A criação de protótipos feitos a partir da Impressão 3D, contribui por uma melhor obtenção da fabricação final de uma peça. Para a obtenção dos resultados utilizou-se a impressora 3D modelo *Tow Trees Bluer* (fabricante *Tow Trees*); material ASA (empresa 3DX); *Software* de fatiamento *Prusa Slicer* (fabricante *Prusa*); *Software* de modelagem *Fusion 360* (Autodesk), a fim de obter o tempo de produção, quantidade de material gasto, parâmetros de configuração para se obter peças com boa qualidade e resistência, podendo ser comparada com peças do mesmo modelo fabricadas por injeção plástica. Neste trabalho realizou-se uma revisão de literatura mediante pesquisa da base de dados *Academic Gloogle*, *Scielo*, Autodesk, Empresas de Engenharia, Sites dos *Softwares* utilizados, e da fabricante do material utilizado para impressão das peças.

PALAVRAS-CHAVE: Impressão 3D. Indústria. Manufatura aditiva. Prototipagem.

3D PRINTING IN RAPID PROTOTYPING OF INDUSTRIAL PRODUCTS

ABSTRACT: This work aims to address the evolution of 3D Printing and its use in industrial prototyping processes, enabling production time, and the creation of products of high geometric complexity. The creation of prototypes made from 3D Printing, contributes to a better achievement of the final manufacturing of a piece. To obtain the results it was used the 3D printer model *Tow Trees Bluer* (*Tow Trees* manufacturer); ASA material (3DX company); slicing *Software Prusa Slicer* (*Prusa* manufacturer); modeling *Software Fusion 360* (Autodesk), in order to obtain the production time, amount of material spent, configuration parameters

to obtain parts with good quality and resistance, which can be compared with parts of the same model manufactured by plastic injection. In this work a literature review was performed by researching the *Academic Gloogle* database, *Scielo*, Autodesk, Engineering Companies, *Software* Sites used, and the manufacturer of the material used for printing the parts.
KEYWORDS: 3D Printing. Industry. Additive manufacturing. Prototyping.

1 | INTRODUÇÃO

Como um meio de fabricar objetos, a impressão 3D é um processo de fabricação que se adiciona material a partir de um código de programação gerado por um computador e inserido numa máquina que irá imprimir objetos camada por camada (MICALLEF, 2015).

Atualmente, com o aumento das indústrias pelo mundo de diversos produtos, acabam se tornando competitivas tendo como uma vantagem a alteração do processo de desenvolvimento de produto (PDP), por meio da manufatura aditiva, com ênfase no modelo FDM (*Fused Deposition Modeling*) que é o mais utilizado mundialmente, devido a sua maior facilidade de uso, podendo utilizar vários materiais com diferentes características, como – a resistência mecânica e, térmica, visando redução do tempo de produção e aumento da qualidade.

O método de FDM é um processo de fabricação aditiva (FA), dentro do domínio da extrusão de matérias. A modelagem por deposição fundida constrói peças camada por camada, depositando seletivamente o material fundido em um ponto selecionado durante o fatiamento do modelo 3D por um software como, por exemplo, o *Prusa Slicer*, que funciona utilizando uma malha no plano XYZ, e o código de fatiamento *g-code*. É usado nesse processo polímeros termoplásticos que vêm em carreteis, chamados no mercado de filamentos, em que, são extrudados pelo *Hotend* com a temperatura adequada para a aplicação, informada pelo fabricante, para formar as peças físicas que, modeladas em *Software* CAD (*Computer Aided Design*).

Os polímeros termoplásticos como: PLA (Ácido Polimático), ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), PTG (Polietileno Tereftalato), TPU (Termoplástico de Poliuretano) e o ASA (Acrilonetrilo Estireno Acrilato) que é um aperfeiçoamento do filamento ABS, fornece melhores características a resistência mecânica, proteção UV, são os termoplásticos comumente mais usados para impressão 3D, sendo sua seleção feita a partir da definição das características que se deseja no produto a ser impresso (Stratasys).

A prototipagem rápida permite a elaboração de métodos de desenvolvimento de produtos, sendo este realizado em etapas, permitindo a interação de diversas áreas como: planejamento, desenvolvimento e execução, tendo como principal foco o desenvolvimento de componentes funcionais, protótipos e formas de objetos em um curto período, e respeitando as especificações exigidas para o produto final (VOLPATO *et al.*, 2007).

Tendo em vista que o método de fabricação por manufatura aditiva FDM materializa protótipos, peças funcionais, por meio da deposição de camada sobre camada, e o método de fabricação por injeção plástica fabrica as peças por meio do processamento do polímero acima do ponto de transição vítrea (TG), que funciona como um fluído viscoso. Sendo assim, surge a problemática do quão próxima é a resistência de uma mesma peça feita por impressão 3D – FDM e injeção plástica. Levando este impasse em consideração, será necessário realizar um estudo aprofundado nos métodos de configuração de fatiamento, utilizando o *Prusa Slicer*, para definir o quão próxima uma peça feita por deposição de camada pode chegar à resistência de uma peça produzida por injeção plástica.

2 I MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa aborda a análise de peças produzidas em FDM, impressa pela impressora *3D Tow Trees Blues*, utilizando o filamento ASA, mostrando a modelagem da peça, no software *CAD Fusion 360*, os tipos de parâmetros de configurações para a fabricação, no software *Prusa Slicer*, onde foram feitos três testes utilizando configurações diferentes, após os testes a peça foi comparada com o seu modelo produzido por meio de injeção plástica, sendo a mesma disponibilizada pela *General Eletric*, localizada na Unidade Técnica Estadual (UTE) Porto de Sergipe I.

Para o dimensionamento da peça – grampo de suspensão de 8 bar, foi utilizado como ferramentas o Paquímetro e Escalímetro. O processo de modelagem 3D foi realizado com auxílio do software *Fusion 360*, em seguida o modelo foi convertido para o formato -.stl, e enviado para o software de fatiamento *Prusa Slicer*, onde nele o modelo tem suas configurações definidas, incluindo as configurações do material ASA, que foi utilizado para a fabricação do modelo.

Durante o estudo de caso, foram realizados três testes, a fim de selecionar a melhor configuração, levando em consideração a velocidade de impressão e de retração, a altura da camada impressa, temperatura de extrusão, densidade de preenchimento, espessura das camadas externas e a orientação da peça sobre a mesa da impressora, como mostra a Figura 1, sendo na horizontal ou na vertical.

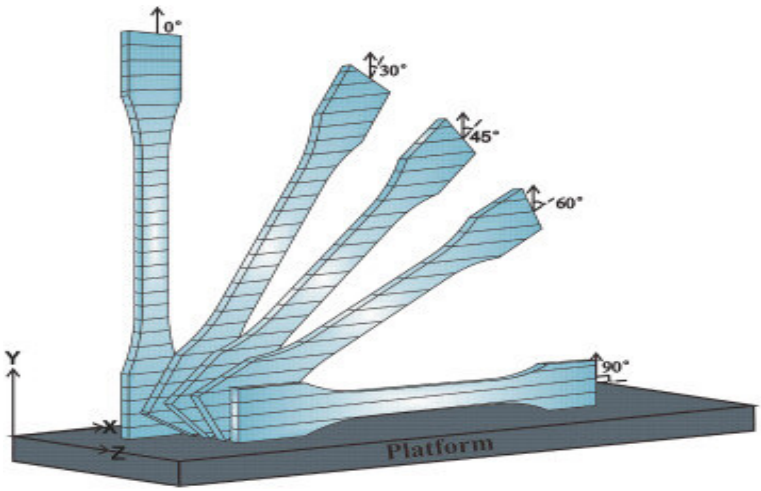


Figura 1 – Posições de impressão das camadas.

Fonte: Saldanha (2021).

3 I RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Peça utilizada como modelo

A peça, (Figura 2), usada como modelo de fabricação é um grampo de suspensão de 8 bar, fabricado com policarbonato, por meio de injeção plástica.

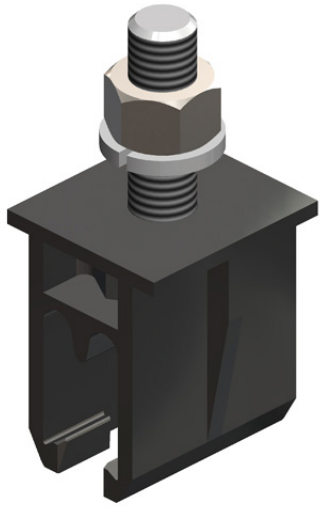


Figura 2 – 8 bar, grampo de suspensão, policarbonato preto.

Fonte: Conductix-wampfler.

3.2 Medidas da Peça

A peça originalmente injetada – (Figura 3), foi enviada por um integrante da GE para que fosse possível fazer o dimensionamento, visto que as medidas são de extrema importância para a modelagem e fabricação (Figura 4).

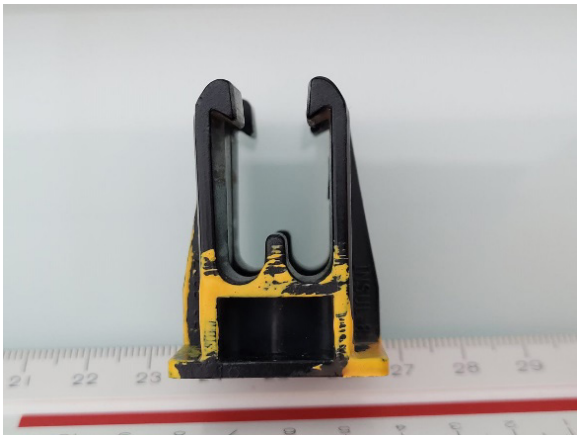


Figura 3 – Fotografia da peça a ser fabricada por impressão.

Fonte: Próprio autor.

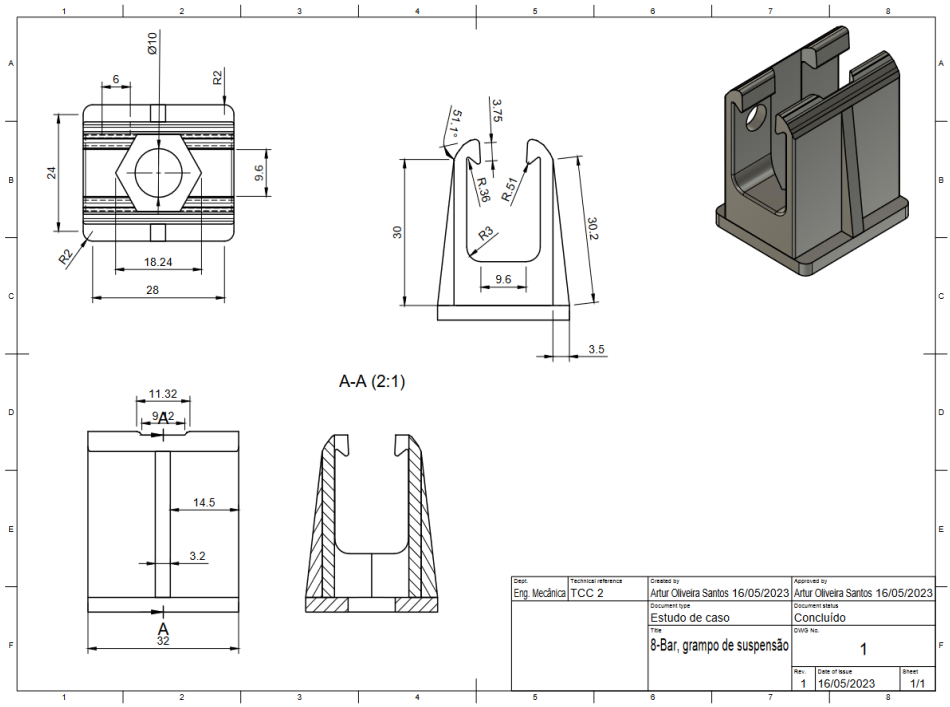


Figura 4 – Desenho técnico da peça com dimensional.

Fonte: Próprio autor.

3.3 Modelagem 3D

Para a modelagem 3D da peça foi utilizado o *software CAD Fusion 360*, onde foi possível transformar o desenho 2D em um objeto 3D, (**Figura 5**). Em seguida, o arquivo 3D foi convertido para o modelo .stl, no próprio *Fusion 360,* e salvo na pasta de documentos do projeto.

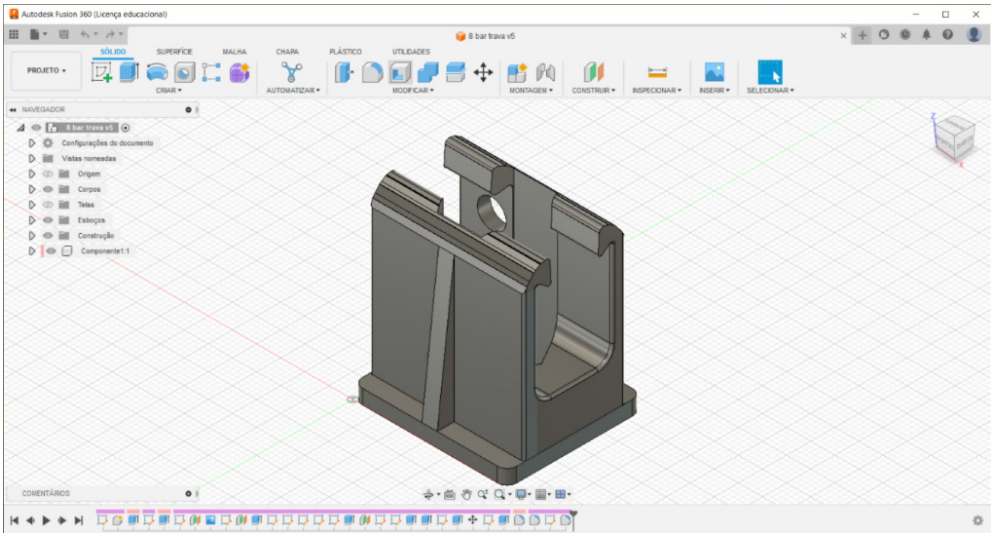


Figura 5 – Peça modelada no Fusion 360.

Fonte: Próprio autor.

3.4 Fatiamento do modelo 3D e impressão

Para o fatiamento foi utilizado o software *Prusa Slicer*, onde nele foi possível configurar os parâmetros de impressão e transformar o modelo .stl, em um modelo no formato - *.gcode*, para ser colocado para impressão.

Para a configuração de impressão foi levado em consideração as características do filamento ASA, visto que, cada material apresenta propriedades diferentes. O quadro 1 apresenta a configuração utilizada no teste 1 de impressão.

ASA	
Velocidade máxima	40 mm/s
Velocidade de retração	30 mm/s
Altura da camada	0,24 mm
Temperatura da primeira camada	235°C
Temperatura das camadas subsequentes	235°C
Preenchimento	100%
Espessura das camadas externas	3 mm
Temperatura da mesa de impressão	85°C
Tipo de suporte	Grade

Quadro 1 – Configuração do teste 1.

Fonte: Próprio autor.

No primeiro teste a peça levou certa de 1h:27min para ser impressa utilizando suportes em grade como ilustrado na Figura 6, esse tipo de suporte deixou marcas na peça. Além disso, a peça impressa com 100% de preenchimento (Figura 7), fez com que perdesse a sua flexibilidade durante o encaixe, o que levou a ruptura, (Figura 8).

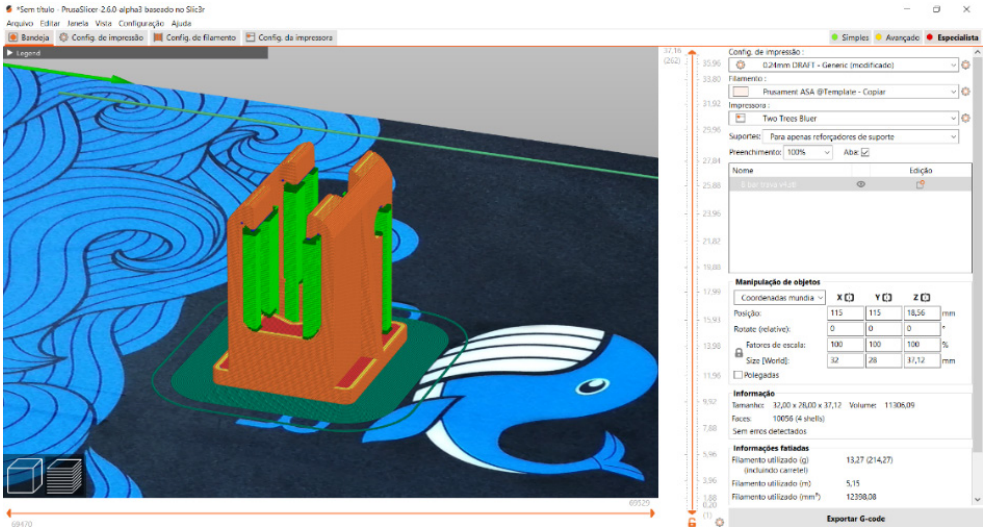


Figura 6 – Peça com 100% de preenchimento e usando suporte em grade – objeto em verde.

Fonte: Próprio autor.

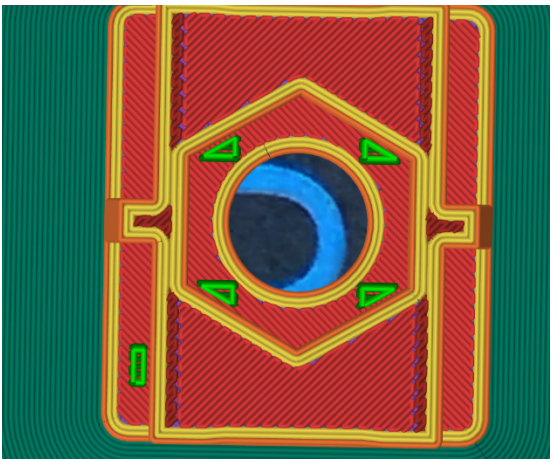


Figura 7 – Preenchimento 100%.

Fonte: Próprio autor.

Figura 8 – Ruptura da peça ao realizar o encaixe.

Fonte: Próprio autor.

No segundo teste a peça levou cerca de 1h:19min, sendo assim, com a nova configuração houve um ganho de tempo de 8 min o que traz muitos benefícios na velocidade de produção e custos. O tipo de suporte foi alterado para o formato *organic*, que possibilita a impressão do modelo com maior qualidade superficial, (Figura 9). Além disso, foi alterado a densidade do preenchimento para 40%, (Figura 10), o que possibilitou a peça uma maior flexibilidade e resistência, visto que peças plásticas tem uma maior resistência quando são fabricadas com vazios, pois isto reduz a concentração de tensões, tornando a peça mais resistente aos esforços nela sofrida, outra configura alterada está na espessura da parede externa que passou e 3 mm para 4 mm, trazendo maior resistência ao produto. As configurações do segundo teste estão listadas no quadro 2.

ASA	
Velocidade máxima	40 mm/s
Velocidade de retração	30 mm/s
Altura da camada	0,24 mm
Temperatura da primeira camada	235°C
Temperatura das camadas subsequentes	235°C
Preenchimento	40%
Espessura das camadas externas	4 mm
Temperatura da mesa de impressão	85°C
Tipo de suporte	*Organic*

Quadro 2 – Configuração do teste 2.

Fonte: Próprio autor.

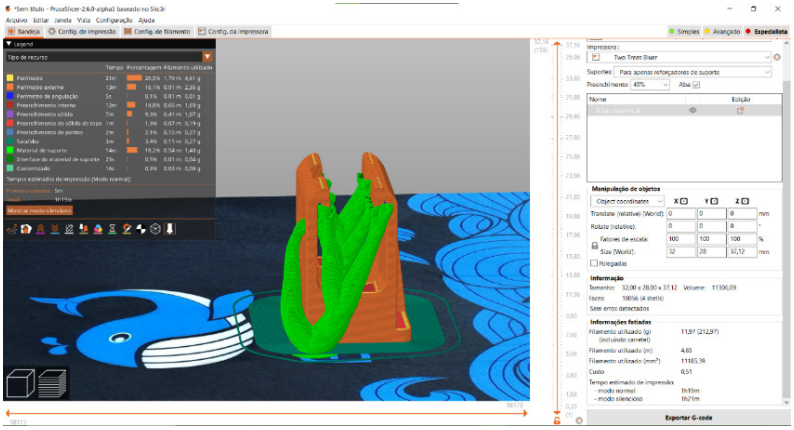


Figura 9 – Impressão com suporte do tipo *organic* – objeto em verde.

Fonte: Próprio autor.

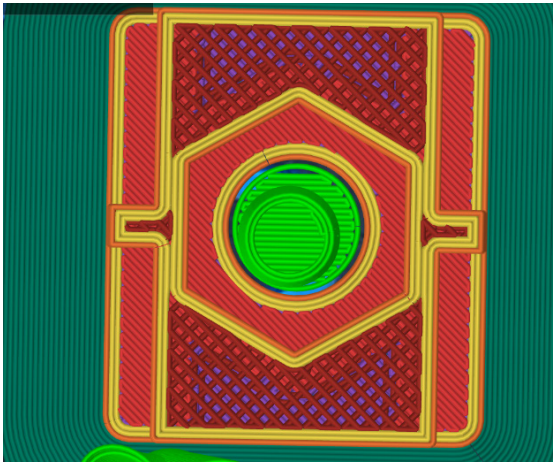


Figura 10 – Preenchimento 40%.

Fonte: Próprio autor.

No terceiro teste, foi utilizado as configurações do teste 2, contudo, modificando a orientação de impressão da peça. A peça foi impressa em duas orientações, sendo a primeira impressão na horizontal, (Figura 11), e a segunda na vertical, (Figura 13).

Figura 11 – Impressão na horizontal.

Fonte: Próprio autor.

A impressão na horizontal fez a peça perder algumas das suas propriedades anisotrópicas, pois o sentido das camadas ficaram opostas a direção da força aplicada. Sendo assim, a peça ficou fragilizada e rompeu como mostra a Figura 12.

Figura 12 – Peça fraturada, impressa na horizonta.

Fonte: Próprio autor.

A impressão na vertical tornou a peça mais resistente aos esforços de compressão, tração, e flexão do material.

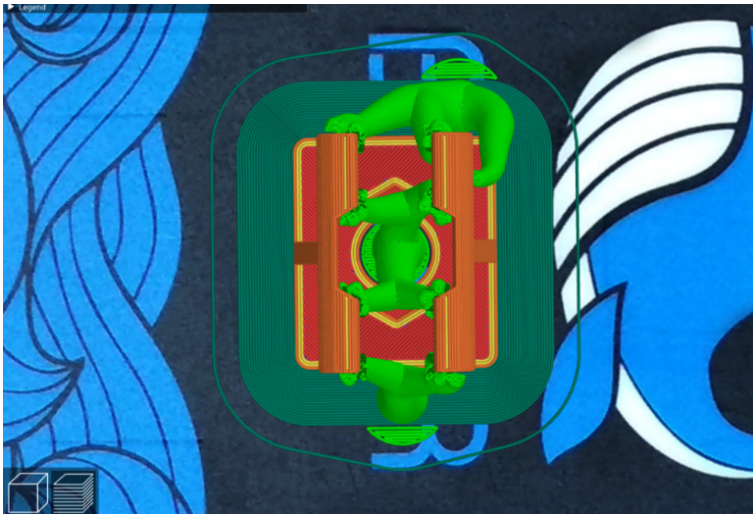


Figura 13 – Impressão na vertical.

Fonte: Próprio autor.

Com a impressão na vertical o encaixe da peça ficou mais resistente, evitando a sua ruptura, podendo ser usada como mostra a Figura 14.

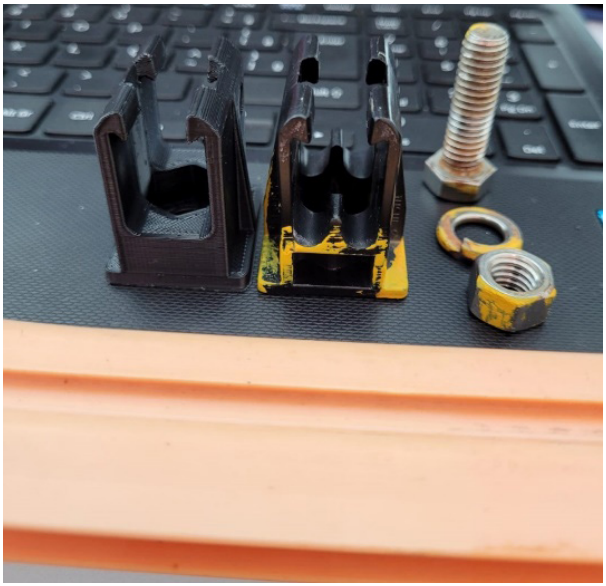


Figura 14 – Peça final.

Fonte: Próprio autor.

As peças impressas podem chegar próximas as características mecânicas de peças injetadas, configurando corretamente os parâmetros de impressão, podendo serem substituídas em algumas aplicações, como no caso mostrado do grampo de suspensão, (COSTA, 2019). Há também, a possibilidade de melhorias para a fabricação de peças futuras, como o uso de um material mais flexível como, por exemplo o Polietileno Tereftalato (PTG), com fibra de carbono, ou o Nylon. Além disso, o uso de uma impressora 3D fechada, irá permitir uma melhor adesão as camadas, devido ao controle térmico na cabine de impressão, (dddrop).

4 I CONCLUSÕES

Neste avaliamos a possibilidade de impressão 3D de um grampo de suspensão, 8 bar, feito de policarbonato preto, por meio de injeção plástica, o mesmo foi cedido pela GE UTE Porto de Sergipe I.

Inicialmente, as medidas da peça foram tomadas, para poder ser feita a modelagem 3D no *software CAD Fusion 360.*

Em seguida, o modelo 3D foi convertido para o formato .stl, sendo este usado no *software* de fatiamento. As configurações de impressão passaram por três testes. No primeiro teste foi utilizado 100% de preenchimento, com suportes do tipo grade, impresso na vertical. Observou-se que a peça com alta densidade deixou a estrutura com pouca flexibilidade, permitindo a ruptura durante o encaixe.

No segundo teste, foi alterado foi alterado o preenchimento para 40%, e o tipo de suporte para *organic* – o que permitiu uma impressão em menos tempo, em relação a impressa no teste um, além de melhorar a qualidade superficial. A diminuição da densidade trouxe maior flexibilidade e resistência, visto que peças plásticas com vazios possuem uma boas características mecânicas.

Para o terceiro teste, a orientação de impressão foi alterada sendo impressa na horizontal e na vertical, porém usando a mesma configuração do teste 2. Foi possível perceber que a impressão na horizontal tornou a peça mais frágil, pois as camadas ficaram no sentido oposto da força aplicada durante o encaixe, forçando o deslocamento de camadas. Já na peça impressa na vertical, essa fragilidade não foi observada, pois as camadas foram impressas no sentido da força, dessa forma, o encaixe foi possível, sem haver a ruptura do protótipo.

5 I AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sempre estar ao meu lado, e ao professor e amigo João Domingos por todo apoio na pesquisa cientifica deste trabalho.

REFERÊNCIAS

AUTODESK. 3D Printing. Disponível em: https://www.autodesk.com/solutions/3d-printing. Acesso em: 01 abr. 2023.

COSTA, Raquel Maria Barroso. Atualização de uma Impressora 3D FDM tipo Delta. 2019.

Dddrop. Impressora 3D Industrial. Disponível em: < https://dddrop.com.br/impressoras-3d-rapid-one/>. Acesso em: 09 de junho de 2023.

GALDAMEZ, E. V. C.; CARPINETTI, L. C. R. Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos no processo de injeção plástica. **Gestão & Produção**, v. 11, p. 121-134, 2004.

GENERAL ELECTRIC. Mentes unidas: como a GE e um visionário da impressão 3D uniram forças? 2017. Disponível em: https://gereportsbrasil.com.br/mentes-unidas-como-a-ge-e-um-vision%C3%A1rio-da-impress%C3%A3o-3d-uniram-for%C3%A7as-d5217e47a148. Acesso em: 03 abr. 2023.

MICALLEF, Joe. **Begining Design for 3D printing**. Califórnia: Apress, 2015. 409p.

PRUSA3D. Download PrusaSlicer. Disponível em: https://help.prusa3d.com/article/download-prusaslicer_2220. Acesso em: 16 maio 2023.

SALDANHA, L. Por que a impressão 3D está cada vez mais sendo utilizada para peças de uso final? 2021. Disponível em: https://www.manufaturadigital.com/por-que-a-impressao-3d-esta-cada-vez-mais-sendo-utilizada-para-pecas-de-uso-final/. Acesso em: 10 maio 2023.

STRATASYS. **Tecnolofia FDM – Onde a função encontra a forma**. Disponível em: https://www.stratasys.com/br/guide-to-3d-printing/technologies-and-materials/fdm-technology/. Acesso em: 01 abril. 2023.

TOW TREES 3D. Tow Trees Bluer. Disponível em: https://twotrees3d.com/budget-3d-printer/. Acesso em: 16 maio 2023.

VOLPATO, Neri *et al*. **Prototipagem rápida:** tecnologias e aplicações. Editora Blucher, 2007.

VOLPATO, Neri. **Manufatura aditiva:** tecnologias e aplicações da impressão 3D. Editora Blucher, 2017.

CAPÍTULO 7

ANÁLISE DE RESISTÊNCIA A FLEXÃO DE COMPÓSITOS COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DE COBRE E FIBRAS ALCALINAS DE BAMBU

Data de aceite: 03/07/2023

Alessandro José Gomes dos Santos
Faculdade de Engenharia Industrial
Universidade Federal do Pará – UFPA,
Campus Abaetetuba
Abaetetuba– Pa, Brasil
Faculdade de Engenharia Mecânica,
Centro Universitário Maurício de Nassau - UNINASSAU
Belém-Pa, Brasil
https://orcid.org/0000-0002-9892-6682

Rian Cristian Douro Amorim
Faculdade de Engenharia Química - Universidade Federal do Pará – UFPA

Deibson Silva da Costa
Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Pará – UFPA, Campus Ananindeua – Pa

Emerson Cardoso Rodrigues
Faculdade de Engenharia Química - Universidade Federal do Pará – UFPA

Diego Cardoso Estumano
Faculdade de Biotecnologia, Universidade Federal do Pará – UFPA

José Antônio da Silva Souza
Faculdade de Engenharia Química - Universidade Federal do Pará – UFPA

RESUMO: A grande área de engenharia dos materiais busca a todo momento uma alternativa sustentável e de baixo custo para a produção de novos itens, trazendo vantagens à sociedade e ao meio ecológico. Buscando trazer uma solução viável para o problemas ambientais e assim minimizar os seus impactos, o presente trabalho analisou mecanicamente por meio de ensaios de Flexão em compósitos de matriz polimérica (MP) com inserção de resíduo de cobre (RCU) com granulometria de 100 MESH com adição de 10%, 20% e 30% e fibras de bambu (FB) tratadas (TR) com NaOH a 5% nos comprimentos de 15 mm e 30 mm com uma duração de 2 horas no tratamento em solução. A resistência à flexão atingiu o valor de 123,13 MPa em FB15mmTR/RCU30% e de 121,64MPa para FB30mmTR/RCU30%.
PALAVRAS-CHAVE: Sustentável; Bambu; Ecológico; Flexão;

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico aponta para a necessidade de novos materiais, de modo a atender características necessárias para uma boa aplicação. Diante disso, os materiais

compósitos apresentam propriedades fundamentais que buscam agregar valores como segurança, meio ambiente e economia. (Daniel et al., 2020).

Do ponto de vista de impactos ambientais, a construção civil é uma das maiores geradoras seja na produção da matéria prima, transporte de materiais, ruídos, impermeabilização do solo ou até na geração de resíduos de construção e demolição (Spadotto et al., 2011).

A preocupação ambiental tem gerado interesse napesquisa de novos materiais que estejam alinhados com os princípios da sustentabilidade. Entre essesmateriais, atualmente, encontram-se os compósitosproduzidos a partir de recursos de fontes renováveis (Calegari e Oliveira, 2016).

Além disso, a produção de compósitos visa a utilização de materiais usados muitas vezes com oobjetivo de obter propriedades específicas, diferentes daquelas encontradas isoladamente em cada constituinte. Para o compósito ter um bomdesempenho, além do tipo, quantidade e orientação das fibras é necessária uma boa aderência entre os materiais. (Vieira et. al., 2016).

Portanto, torna-se importante o desenvolvimento desta pesquisa, para então, trazer à tona perspectivas sustentáveis e economicamente viáveis.

MATERIAL E MÉTODOS

Materiais e Equipamentos utilizados

- Agitador de Peneiras
- Peneira manual 100 MESH - Fabricante Tyler;
- Estufa - Fabricante DE LEO Equipamentos Laboratoriais;
- Balança analítica – Fabricante URANO RASIL;
- Serra de bancada – Laboratório de Engenharia Química
- Máquina de ensaio universal – Fabricante KRATOS
- Molde de Silicone

Figura 1. Estufa.

Figura 2. Balança Analítica.

Figura 3. Molde de Silicone.

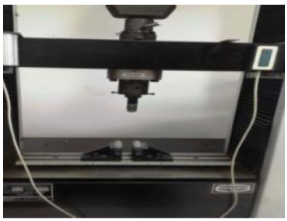


Figura 4. Maquina de ensaio.

Matérias de partida

Fibras de Bambu

As fibras de Bambu foram extraídas no campus profissional I da Universidade Federal do Pará, em seguida foram cortadas com uma tesoura metálica, nos comprimentos de 15 mm de 30 mm e posteriormente, algumas delas, foram tratadas em solução alcalina de hidróxido de sódio 5% durante o período de 2h, após o período a solução foi drenada e as fibras foram lavadas com água destiladas para retirar o excesso de NaOH, e colocadas para secarem na estufa a 60 ºC.

Figura 5. Fibras de Bambu.

Resíduo de Cobre

O resíduo de Cobre fornecido pela empresa Vale S.A, oriundo da Mina do Sossego, localizada em Canaã dos Carajás, foi submetido a secagem em estufa por 24

horas à temperatura de 105°C. Em seguida sofreu peneiramento manual em peneira de granulometria 100 Mesh da série Tyler.

Figura 6. Resíduo de Cobre.

Materiais sintéticos

Matriz polimérica

Para a matriz foi utilizada a Resina PoliésterIsoftálico (AM 910 AEROJET), de média reatividade, amarelada, não acelerada, baixa viscosidade. O acelerador de Cobalto CAT MET UMEDECIDO 1,5% (Solução de Octoato de cobalto 1,5%) e o Catalisador BUTANOX M-50 (MEK-P).

Métodos

Confecção dos Corpos de Prova

Para a produção dos compósitos foi utilizado um molde de silicone, no qual cada corpo de prova foi confeccionado nas dimensões de 12,7 mm de largura e 3,0 mm de espessura, o método aplicado foi o manual, sendo o resíduo de cobre utilizado com a granulometria de 100 Mesh, variando em 10%, 20% e 30% as proporções em massa, as fibras de bambu sendo cortadas com auxílio de uma tesoura metálica nos comprimentos de 15 mm e 30 mm, sendo previamente separadas e colocadas em solução alcalina de hidróxido de sódio 5%. Os corpos de prova foram produzidos no molde e após 24 h de cura foram levados ao teste de flexão. Foram obtidos um total de 8 corpos de prova em cada série produzida.

Ensaio de Flexão

Com base nas curvas carga-deslocamento e conhecendo as dimensões dos corpos de prova é possível determinar a resistência do compósito a flexão (σ) e o módulo de elasticidade na flexão (E). Conforme descrito na equação a seguir.

$$\sigma = \frac{3PL}{2BW^2} \quad (1)$$

Os ensaios de Flexão foram realizados segundo a norma ASTM D790 e utilizaram as seguintes medidas como apresentado na figura 8.

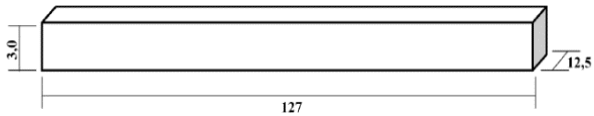


Figura 7. Esquemático das dimensões (em mm) para ensaios de flexão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Resultados de resistência à flexão dos compósitos com inserção de resíduo de cobre e fibra de bambu 15 mm tratadas

Os resultados para a resistência mecânica, por meio dos ensaios de flexão, são apresentados na tabela 1

Fração mássica (%)	Tensão de Flexão (MPa)	Deflexão (mm)	Módulo de flexão (GPa)
Matriz Polimérica	82,86(±3,19)	1,25(±0,38)	13,80(±1,22)
FB15mmTR + RCU10%	101,28(±2,62)	3,47(±0,88)	17,13(±1,23)
FB15mmTR + RCU20%	115,04(±5,36)	3,90(±0,76)	20,80(±2,09)
FB15mmTR + RCU30%	123,13(±6,34)	3,55(±0,55)	23,02(±2,78)

Tabela 1: Resultados do ensaio de flexão dos resíduos de cobre e das fibras de bambu de 15 mm tratadas.

Na tabela 1, quando se adiciona fibras tratadas quimicamente na matriz polimérica, nota-se um gradativo aumento da resistência à flexão, superior à matriz polimérica. Tais resultados podem ser evidenciados na figura 8.

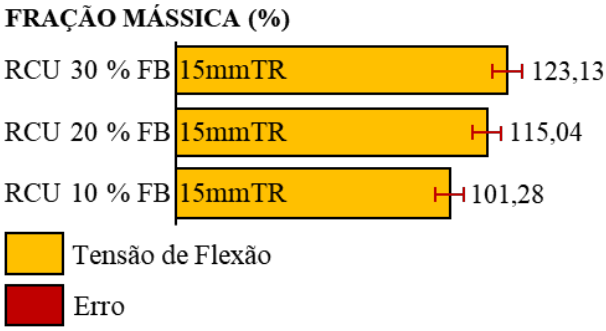


Figura 8: Gráfico da Fração Mássica / Tensão de Flexão.

Resultados de resistência à flexão dos compósitos com inserção de resíduo de cobre e fibra de bambu 30 mm tratadas

Os resultados para a resistência mecânica, por meio dos ensaios de flexão, são apresentados na tabela 2.

Fração Mássica (%)	Tensão de Flexão (MPa)	Deflexão (mm)	Módulo de Flexão (GPa)
Matriz Polimérica	82,86(±3,19)	1,25(±0,38)	13,80 (±1,22)
FB30mm TR + RCU10%	103,42(±4,23)	2,76(±0,64)	19,35(±2,51)
FB30 mm TR + RCU20%	109,37(±4,05)	2,80(±0,52)	22,83(±1,99)
FB30 mm TR +RCU30%	121,64(±4,93)	2,43(±0,60)	24,68(±1,67)

Tabela 2 - Resultados dos compósitos com fibra de bambu 30 mm tratadas e resíduo de cobre.

Na tabela 2, quando se adiciona fibras tratadas quimicamente na matriz polimérica, nota-se um gradativo aumento da resistência a flexão, principalmente conforme a fração de resíduo de cobre vai aumentando de 10%, 20% até 30% que obteve o valor de 121,64 MPa.

Na tabela 2, quando se adiciona fibras tratadas quimicamente na matriz polimérica, nota-se um gradativo aumento da resistência à flexão, superior à matriz polimérica. Tais resultados podem ser evidenciados na figura 9.

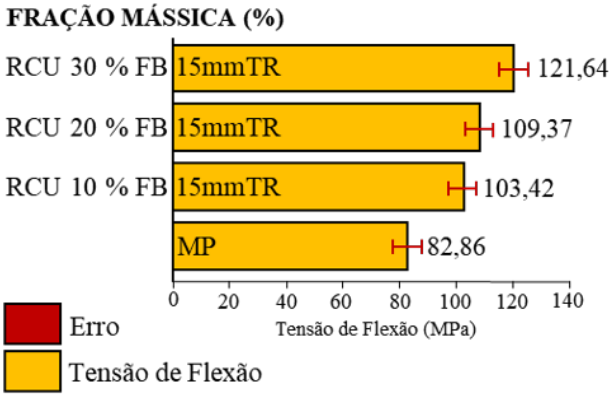


Figura 9. Gráfico de ensaio de tensão de flexão dos compósitos.

Pode-se observar através do gráfico, que ao adicionarmos fibras de bambu e resíduo de cobre, tem-se um aumento perceptível em relação a tensão de flexão, pois quando a fibra é tratada quimicamente, sua resistência fica mais satisfatória quando comparada a matriz polimérica (Moura, 2019), isso se deve ao fato da melhor interação na interface matriz/fibra, pois o tratamento contribui para retirada da umidade no interior das fibras, ocorrendo uma diminuição de lignina e da hemicelulose, uma eliminação de impurezas, desta forma, melhorando as propriedades mecânicas. O acréscimo do resíduo de cobre também agrega valor a esse melhor desempenho do compósito, principalmente quando acrescido de 30% de resíduo, pois nas frações 10% e 20% ocorre a fácil sedimentação dos resíduos na matriz polimérica (BANNA, 2017).

CONCLUSÃO

Os compósitos polímericos com fibra de bambu (15 mm) tratadas quimicamente, com a inserção de 30% de resíduo de cobre, apresentou aumento na resistência mecânica de flexão, com o valor de 123,13 MPa. Ademais, destaca-se que os compósitos, com fibras de bambu (30 mm) tratadas quimicamente, com 30% de resíduo de cobre, apresentou um comportamento mecânico satisfatório em relação a matriz polimérica. Em geral, os resultados de resistência a flexão dos compósitos estudados evidenciaram um aumento da resistência em relação a matriz polimérica, os quais podem beneficiar a sociedade como um todo e, especialmente, a indústria de novos materiais, assim, resultando na reducao de custos, bem como, pormovendo a reutilização de residuos minerais.

AGRADECIMENTOS

A CAPES, ao Laboratório de Engenharia Qímica (LEQ), Laboratório de Engenharia Mecânica (LABEM), localizados na Universidade Federal do Pará (UFPA).

REFERÊNCIAS

ASTM D790, Standard Test Methods for FlexuralProperties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, ASTM International, 2017.

BANNA, W. R. Influência do resíduo de flotação de minério de cobre nas propriedades físicas e mecânica de compósitos de matriz termofixa e fibras de bananeira (Musa Sapientum, Musacae). Doutorado (Tese). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia-UFPA ,2017.

CALEGARI, E. P.; OLIVEIRA, B. F. DE. Compósitos a partir de materiais de fontes renováveiscomo alternativa para o desenvolvimento de produtos. Sustentabilidade em Debate, v. 7 n.1, p. 140-155, 2016.

DANIEL, B. T. F. et. al. Efeito da incorporação de resíduo mineral de calcário nas propriedades físicas e de resistência mecânica em compósitos poliméricos. Brazilian Jornal of Development, v. 6 n.2, p. 6493-6505, 2020.

MOURA, C. R. Aplicações e tratamentos das fibras de bambu e similares: uma revisão. The jornal of engineering and exact sciences, vol. 05 N. 05,2019.

SPADOTTO, A. et. al. Impactos ambientais causadospela construção civil. In: Unoesc & Ciência–ACSA, v. 2 n.2, p. 173-180, 2011.

VIEIRA, P. R., CARVALHO, E. M. L., VIEIRA, J. Análise das propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibra de vidro. ENGEVISTA, vol. 18 n. 2, p. 363-374, 2016.

APPLICATION OF PERESKIA ACULEATA MILL. LEAVES POWDER FOR REMOVAL OF CD(II) AND PB(II) FROM MONO- AND BICOMPONENT SYSTEMS

Data de aceite: 03/07/2023

Josiane Lopes de Oliveira
Department of Chemistry, Institute of Biological and Exact Sciences (ICEB), Federal University of Ouro Preto, Campus Morro do Cruzeiro, Bauxita, Ouro Preto, Minas Gerais, Brazil

Emylle Emediato Santos
Department of Chemistry, Institute of Biological and Exact Sciences (ICEB), Federal University of Ouro Preto, Campus Morro do Cruzeiro, Bauxita, Ouro Preto, Minas Gerais, Brazil

Liliane Catone Soares
Department of Chemistry, Institute of Biological and Exact Sciences (ICEB), Federal University of Ouro Preto, Campus Morro do Cruzeiro, Bauxita, Ouro Preto, Minas Gerais, Brazil

Roberta Eliane Santos Froes
Department of Chemistry, Institute of Biological and Exact Sciences (ICEB), Federal University of Ouro Preto, Campus Morro do Cruzeiro, Bauxita, Ouro Preto, Minas Gerais, Brazil

ABSTRACT: In this work, *Pereskia aculeata* Mill. leaves were used to produce a biosorbent (OPN) to remove Cd(II) and Pb(II) from aqueous solutions. OPN was obtained according to a very simple and green process, without any need for chemical modification. The biosorbent was characterized by FTIR spectroscopy, elemental C, H, and N analysis, scanning electron microscopy, measurement of the point of zero charge pH, and determination of the number of acid functions. Batch studies of the adsorption of Cd(II) and Pb(II) as a function of solution pH were performed using single and binary aqueous solutions. The optimum pH for the adsorption of both ions on OPN was pH 5.0, resulting in adsorption capacities of 95 mg g^{-1} and 27 mg g^{-1} for Pb(II) and Cd(II), respectively. The reuse of OPN was evaluated and it was shown that the use of 0.10 mol L^{-1} HNO_3 solution enabled almost complete desorption of both cations.

KEYWORDS: Raw material, wastewater treatment, biosorption, inorganic contaminants, cadmium, lead.

1 | INTRODUCTION

Cadmium and lead are metals with high toxicity. According to the priority list of hazardous substances published by the Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR), lead is the second most hazardous substance, while cadmium occupies the seventh position on this list (ATSDR, 2019). These metals do not perform any nutritional or biochemical functions in microorganisms, plants, or animals. Their presence in living organisms is highly harmful, even at low concentrations (Kim et al., 2015).

Due to the significant threat of anthropogenic pollution to water resources, effective control of toxic metal pollution is increasingly necessary (Li et al., 2019). Technologies and methods such as physicochemical processes of chemical precipitation, evaporation and concentration, ion exchange, reverse osmosis, electrodialysis, and adsorption have been commonly used to remove toxic metal ions from wastewater (Mi et al., 2012). However, in most cases, these methods are not suitable for the decontamination of large volumes of effluents, due to low operational efficiency and high extraction costs (Volesky, 2001). Therefore, it is essential to search for alternative methods that are both highly efficient and inexpensive, and that generate low amounts of toxic waste at the end of water treatment processes.

Biosorption is defined as the phenomenon in which certain ions or molecules in aqueous solutions bind and concentrate on the surfaces of biological materials such as living or dead microorganisms, algae, plant materials, and industrial and agricultural wastes, among others (Fomina and Gadd, 2014). This process has been widely used to remove organic and inorganic contaminants from aqueous solutions. It is based on multiple physicochemical mechanisms, including absorption, ion exchange, surface complexation, and precipitation. It is a cost-effective, highly efficient (Vanhoudt et al., 2018), and more environmentally friendly method for producing high-quality effluents, while consuming fewer toxic chemicals, resulting in less toxic sludge at the end of the process (Zhao, 2011).

Pereskia aculeata Mill., a plant of the *Cactaceae* family (Butterworth and Wallace, 2005), popularly known as Barbados gooseberry in English (Martin et al., 2017) and as ora-pro-nobis (OPN) in Portuguese, is an unconventional food plant common in Brazil (Cruz et al., 2021). OPN is easy to cultivate in regions with temperatures above 25 °C and high incidence of sunlight (Maciel et al., 2020). This species of cactus has a high content of proteins and mineral elements such as iron, manganese, zinc, and calcium (Maciel et al., 2018), which makes it an excellent option as an ideal supplement for the human diet (Neves et al., 2020).

In addition to nutritional potential, OPN leaves are rich in a non-toxic mucilage composed of the type I arabinogalactan biopolymer, linked to protein components (Neves et al., 2020; Oliveira et al., 2019), which has biological activities and potential applications in pharmaceutical, industrial, medicinal, and food processes (Maciel et al., 2018).

The high content of carbohydrate polymers found in *P. aculeata* is an interesting feature, given that the presence of hydroxide, carboxyl, or nitrogen groups can play an important role in binding metal cations, making this material an attractive option for use in the removal of potentially toxic cations from aqueous solution. Furthermore, OPN is a biodegradable and renewable material with low economic value, which contributes to making it suitable for application in methodologies that are more accessible.

Several recent studies concerning Cd(II) and Pb(II) removal have investigated the performance of alternative materials that offer sustainability, availability in large quantities, and low cost, such as marine green algae (Bulgariu and Bulgariu, 2016), banana stalk, corn cob, and sunflower achene (Mahmood-ul-Hassan et al., 2015), jatoba (*Hymenaea courbaril*) fruit shell (Souza et al., 2017), *Dicerocaryum eriocarpus* plant mucilage (Jones et al., 2016), biochar derived from poplar sawdust (Cheng et al., 2021), kiwi branch (Tan et al., 2022), and tobacco stem (Zhou et al., 2018). However, for these materials to have a high removal capacity, a chemical modification stage is required, which increases the cost of the biosorbent and often involves using toxic chemicals. Therefore, the present study is significant not only for the use of a low-cost, sustainable, and biodegradable adsorbent, but also for achieving high removal capacity without any need for chemical modification pretreatment of the material.

This work describes the use of dried raw biomass as a biosorbent to remove toxic metal cations from mono- and bicomponent systems, at different pH values. The biosorbent was characterized by elemental C, H, and N analysis, Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and scanning electron microscopy (SEM). The point of zero charge (PZC) and the number of acidic sites in the material were also determined.

2 I MATERIALS AND METHODS

2.1 Biosorbent production

Ora-pro-nobis (*P. aculeata*) leaves were collected in Canaã (Minas Gerais state, Brazil). The leaves were washed using tap water and then deionized water (deionizer model ORBC 30A, BFilters). After draining the excess water, the material was dried in an oven (model 315 SE, Fanem) at (60.0 ± 0.5) ºC, until constant weight. The dried leaves were ground using a vertical rotor micro mill (model MA048, Marconi) coupled to a 20-mesh sieve, to obtain OPN powder with homogeneous particles.

2.2 Biosorbent characterization

The surfaces of OPN and OPN loaded with Cd(II) (OPN-Cd) and Pb(II) (OPN-Pb) were analyzed by scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX), using a Tescan Vega3 SB electron microscope with a tungsten filament,

operating with an acceleration voltage of 20 kV, secondary electron detector, and electron backscattering. The sample was deposited on double-sided carbon tape, which was fixed on an aluminum sample holder, followed by coating (twice) with gold using a modular high-vacuum coating system (model Q150RES, Quorum Technologies).

The thermal stability of OPN was studied by heating 20 mg portions of the material between 25 and 900 °C, at a rate of 10 °C min^{-1}, under an atmosphere of synthetic air supplied at a flow rate of 20 mL min^{-1}. These analyses employed a thermal analyzer (model 60H, Shimadzu) and alumina crucible sample holders.

Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) with attenuated total reflectance (ATR) was used to identify the main OPN functional groups involved in the biosorption of metal ions. The spectra were acquired between 400 and 4000 cm^{-1}, with 32 scans per sample, using an FTIR spectrophotometer (model MB3000, ABB Bomem, Quebec, Canada).

The carbon, hydrogen, and nitrogen contents in the adsorbent material were determined by elemental analysis (2400 CHNS/O Series II Analyzer, PerkinElmer).

The coordination number (*CN*) for the complexes formed with Cd(II) or Pb(II), together with the total number of acid functions (n_{H+}) of OPN, were obtained as described by Elias et al. (2022). The n_{H+} value was determined by acid-base titration (Teodoro, 2016). For this, a 100.0 mL volume of standardized sodium hydroxide solution (0.01 mol L^{-1}) was added to a 125 mL Erlenmeyer flask containing (0.1000 ± 0.0001) g of the adsorbent. The system was kept under constant magnetic agitation (SP-Labor stirrer) at 300 rpm for 60 min, at room temperature. The mixture was then subjected to simple filtration using a cellulose filter (type GR 418X10IN, Whatman). A 25.00 mL aliquot of the filtrate was titrated with a standardized solution of hydrochloric acid (0.01 mol L^{-1}), using an alcoholic solution of phenolphthalein as indicator. The n_{H+} value was calculated according to **Equation 1**.

$$n_{H^+} = \frac{(C_{NaOH} \cdot V_{NaOH}) - (C_{HCl} \cdot V_{HCl}) \cdot f}{m} \quad (1)$$

where, C_{NaOH} and C_{HCl} are the concentrations (mmol L^{-1}) of the standardized solutions of NaOH and HCl, respectively, V_{NaOH} is the titrated volume (mL), V_{HCl} is the volume (mL) of the standardized HCl solution, *m* is the mass (g) of the adsorbent, and *f* is a correction factor (100/25).

The point of zero charge (pH_{PZC}) was determined following the methodology described by Noh and Schwarz (1990). Solutions of $NaNO_3$ (0.01 mol L^{-1}) were adjusted to pH 3.0, 4.5, and 6.5 by adding sodium hydroxide and/or nitric acid solutions (both at 0.1 mol L^{-1}). Aliquots of 25.00 mL of each solution with adjusted pH were then transferred to 125 mL Erlenmeyer flasks containing different amounts of the adsorbent material (0.2000, 0.1000, 0.0500, and 0.0200 g). The mixtures were kept for 24 h at room temperature, in an incubator with constant orbital agitation at 130 rpm. The final pH of each solution was then measured (KASVI pH meter). The pH_{PZC} was obtained at the convergence point of the three curves.

2.3 Assays of Cd(II) and Pb(II) adsorption on OPN

Adsorption experiments were performed, in duplicate, using a shaker-incubator (MA 420/B-125/E), by transferring (0.0500 ± 0.0001) g amounts of OPN into 125 mL Erlenmeyer flasks containing 50.00 mL of Cd(II) and/or Pb(II) solution (**Table 1**). The initial pH of all the solutions was adjusted by adding drops of aqueous 0.1 mol L^{-1} HCl or 0.1 mol L^{-1} NaOH solutions. The flasks were kept under constant agitation (130 rpm) at (26 ± 1) °C for 16 h. After this period, the samples were filtered using cellulose filter paper (GR 418X10IN, Whatman) and the filtrate was collected.

The adsorption was evaluated for monocomponent systems, as a function of solution pH, and for bicomponent systems, as a function of solution pH for two different concentrations of Cd(II) and Pb(II), in order to evaluate the influence of cation concentration on cation competition. The experimental conditions for all the adsorption experiments are shown in **Table 1.** The concentrations of Cd and Pb in solution were determined by flame atomic absorption spectrometry (FAAS), using a Varian SpectrAA 50B spectrophotometer.

Parameter	Initial solution pH			
	Monocomponent		Bicomponent I	Bicomponent II
	Cd(II)	Pb(II)	Pb(II) and Cd(II)	
Initial pH	1.5 – 6.0	2.0 – 5.5	1.5 – 5.0	
Concentration / mmol L^{-1}	0.75	0.75	0.75	2.00

Table 1. Experimental conditions used for bath adsorption of Cd(II) and Pb(II) on OPN.[1]

[1] 26 ± 1 °C, 16 h, 130 rpm, 1.0 g L^{-1} of OPN.

The metal ion removal percentages (%*R*) and the amounts of metal ions adsorbed by OPN at equilibrium (q_e, mmol L^{-1}) were determined using **Equation 2** and **Equation 3**, respectively.

$$\%R = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (2)$$

$$q_e = \frac{V(C_0 - C_e)}{m} \quad (3)$$

where, C_0 and C_e (mmol L^{-1}) are the initial and equilibrium adsorbate concentrations, respectively, *V* (L) is the solution volume, and *m* (g) is the OPN mass.

2.4 Reuse evaluation

The ability to reuse the OPN was evaluated in desorption assays using HNO_3 (0.10 mol L^{-1}) and $NaNO_3$ (0.10 mol L^{-1}) solutions and deionized water as eluents. Aliquots of 50.0 mL of an equimolar bicomponent solution (0.75 mmol L^{-1}) of Cd(II) and Pb(II), at pH 5.0, were added to 125 mL Erlenmeyer flasks containing (0.0500 ± 0.0001) g of OPN. The systems were kept under the same conditions of temperature, agitation, and contact time described

in **Section 2.3**. Subsequently, the loaded adsorbent was separated by simple filtration using cellulose filter paper (GR 418X10IN, Whatman) and dried in an oven with air circulation and renewal (model TE-394/1, TECNAL), at (40.0 ± 0.5) °C, until constant weight.

In the next step, (0.0500 ± 0.0001) g of the dry material loaded with both Cd(II) and Pb(II) was added to 50.0 mL of each eluent solution and the systems were kept under the same conditions of temperature, agitation, and contact time described in **Section 2.3**. Once again, the materials were filtered by simple filtration and the concentrations of Cd and Pb in the solutions were determined by FAAS (SpectrAA 50B spectrophotometer, Varian). The desorption percentage was obtained according to **Equation 4**.

$$\%Desorption = \frac{amount of M(II) released}{amount of M(II) adsorbed} \times 100 \quad (4)$$

3 I RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Biosorbent characterization

The elemental analysis showed that OPN was composed of (40 ± 1)% C, (4.8 ± 0.4)% H, and (3.8 ± 0.3)% N. The presence of a large quantity of nitrogen functions in the composition could increase the ability of OPN to remove metal cations, depending on the pH of the solution (see **Section 3.2.1**).

The SEM image of OPN (**Figure 1**) suggested that the morphology of the OPN surface was irregular, with a spongy appearance. This characteristic provided the material with a large contact area, favoring the adsorption capacity for Cd(II) and Pb(II). The EDX spectrum for OPN (**Figure 2a**) showed that among the elements present, carbon and oxygen were predominant, followed by potassium, calcium, chlorine, and magnesium. The EDX spectra of the surfaces of OPN-Cd (**Figure 2b**) and OPN-Pb (**Figure 2c**) showed clear signals for Cd and Pb, confirming the adsorption of the cations on the surface. In addition, the absence of K and Mg peaks and decreases of the Ca peaks for OPN-Cd and OPN-Pb suggested that ion exchange contributed significantly to adsorption of the metals on the OPN surface. The surface mapping SEM-EDX images for OPN-Cd (**Figure 3a**) and OPN-Pb (**Figure 3b)** suggested adsorption with saturation of the OPN surface by Cd(II) and Pb(II). Despite the saturation, it appeared that the distributions of Cd(II) and Pb(II) on the OPN surface were non-uniform.

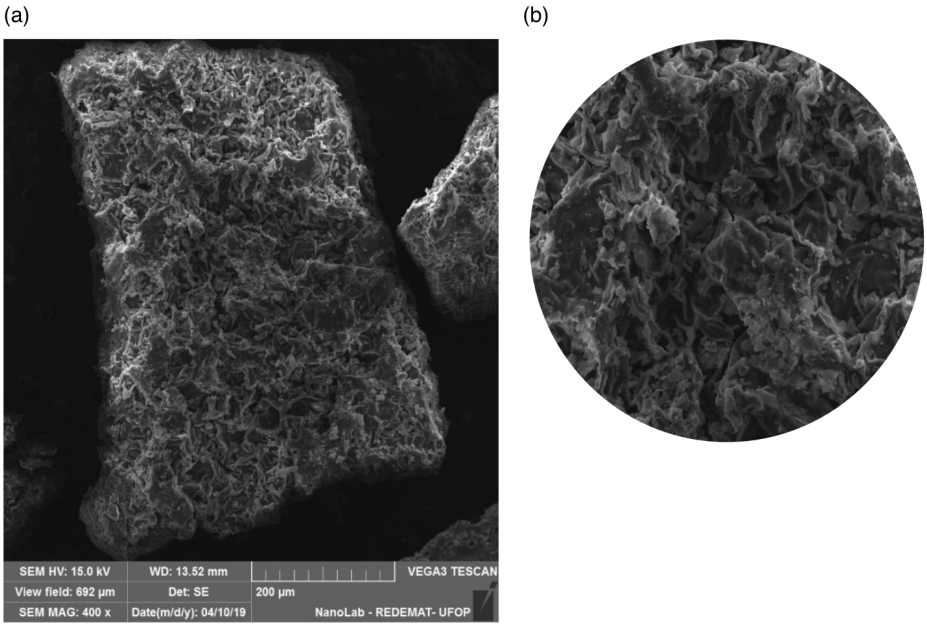


Figure 1. SEM image of OPN at (a) 400x and (b) 1000x magnification.

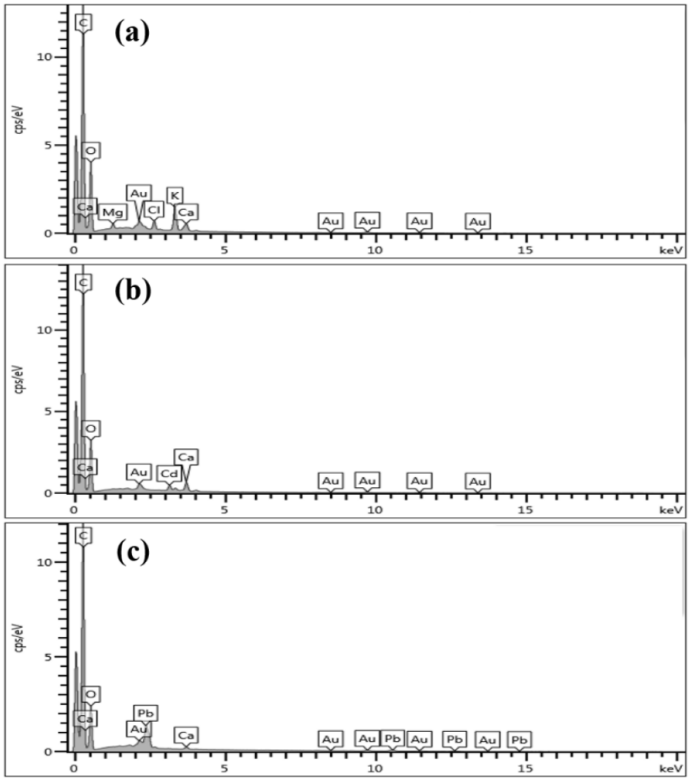


Figure 2. Elemental compositions determined by EDX peaks for (a) OPN, (b) OPN-Cd, and (c) OPN-Pb. The Au (gold) peak was due to the sputter coating.

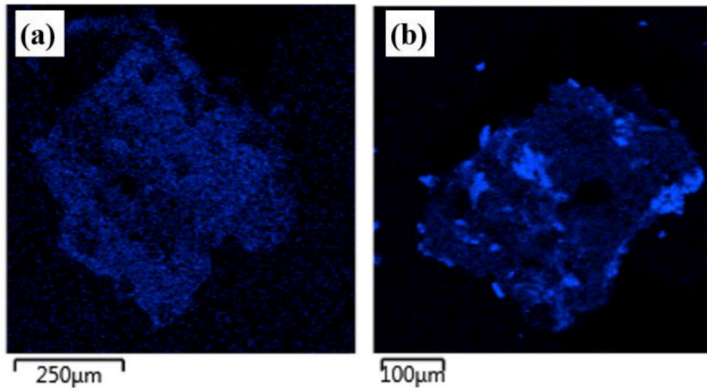


Figure 3. SEM-EDX images with surface mapping for (a) OPN-Cd and (b) OPN-Pb.

The thermogravimetric (TG) and derivative thermogravimetric (DTG) curves for OPN (**Figure 4**) suggested that the thermal decomposition occurred in at least five steps, with six significant mass loss events. The first event (at 30-120 °C) could be attributed to the loss of water physically adsorbed on the sample surface. In the range 170-400 °C, decomposition occurred in two main mass loss events (T_{max} = 258.3 and 292.9 °C), accounting for about 47% of the total mass loss. The event in the range 400-500 °C (T_{max} = 450.2 °C, 35% of the total weight loss) was probably related to the breaking of bonds along carbon chains or the disruption of functional groups present in the structures of polysaccharides, lipids, and proteins of OPN. The last stage of mass loss, in the range 630-900 °C (T_{max} = 646.2, 734.2, 780.6, and 874.8 °C, ~6% of the total weight loss), could be explained by the breaking of the last organic chains and/or charcoal gasification (Aburto et al., 2015).

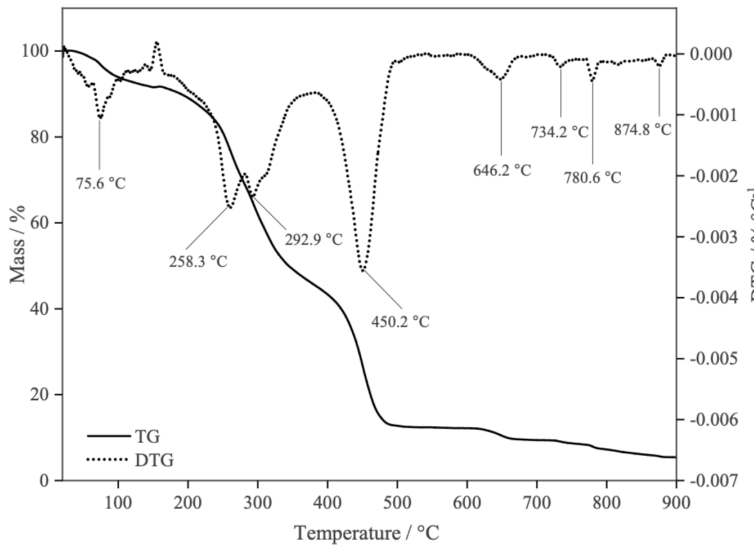


Figure 4. TG and DTG curves for the thermal decomposition of OPN.

FTIR analyses were performed before and after adsorption, in order to understand the interaction between functional groups and Cd(II) or Pb(II). The FTIR spectrum for OPN (**Figure 5**) showed an intense broad band at 3289 cm^{-1}, attributed to vibrational stretching of –OH and –NH groups. Peaks at 2918 and 2850 cm^{-1} corresponded to asymmetric and symmetric axial stretching of the $-CH_2$ cluster, respectively. A band at 1731 cm^{-1} could be ascribed to axial stretching vibrations of the C=O bonds of carboxylic acids or esters. A band at 1622 cm^{-1} could be attributed to superposition of –NH angular deformation and C=O stretching, while stretching of the C–N bond could be observed at 1371 cm^{-1}. A peak at 1315 cm^{-1} corresponded to angular deformation of C–H. A low intensity band at 1240 cm^{-1} was due to stretching of the carboxylic acid C–O group (Pavia et al., 2014). A low intensity peak at 1155 cm^{-1} corresponded to asymmetric C-O-C stretching, related to a β-1-4 glycosidic bond in the polymer chain (Marques Neto et al., 2013). This bond may be associated with cellulose, a natural structural polymer that composes OPN leaves, formed by β-D-anhydroglucopyranose units joined by β(1 ⟶ 4) glycosidic bonds (Klemm et al., 1998). A high intensity band at 1020 cm^{-1} was related to symmetric C–O–C stretching (Pavia et al., 2014).

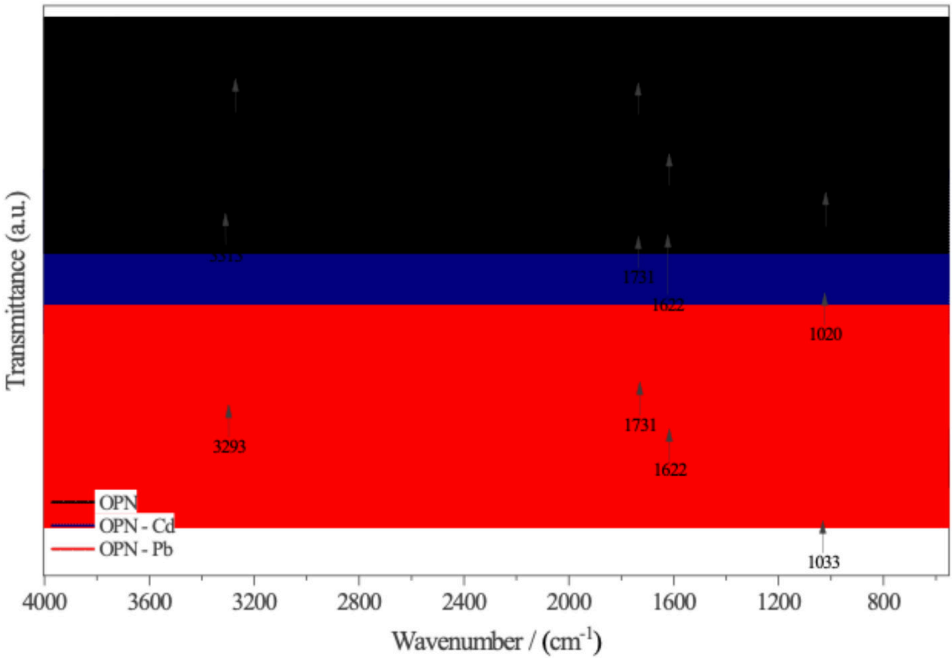


Figure 5. FTIR spectra of OPN, OPN loaded with Cd(II) (OPN-Cd), and OPN loaded with Pb(II) (OPN-Pb).

The FTIR spectra of the OPN loaded with metal ions (Cd(II) and Pb(II)) (**Figure 5**) showed that the OPN band at 3289 cm^{-1} became broader and with small shifts to 3313 and 3293 cm^{-1} for OPN-Cd and OPN-Pb, respectively. In the FTIR spectrum for OPN-Cd, the

peak at 1731 cm^{-1} became more intense, while the strong bands at 1622 and 1020 cm^{-1} were weakened. The FTIR spectrum for OPN-Pb showed no substantial alteration of the bands at 1731 and 1622 cm^{-1}, while the band at 1020 cm^{-1} in the original OPN spectrum increased and shifted slightly to 1033 cm^{-1}. These results suggested that the nature of the predominant interaction for OPN-Cd(II) was different from that for OPN-Pb(II).

The total number of acid functions (n_{H+}) estimated by titration was (5.57 ± 0.08) mmol g^{-1}. Considering $Q_{max,Cd}$ = (1.3 ± 0.1) mmol g^{-1} and $Q_{max,Pb}$ = (1.17 ± 0.08) mmol g^{-1}, the *CN* values for Cd(II) and Pb(II) were around 4.8 and 4.3, respectively. Therefore, it is possible that Cd(II) and Pb(II) were in coordination with acid functions such as carboxylate groups from OPN, with the formation of tetra- and pentacoordinated complexes.

The OPN surface could be positively or negatively charged, depending on the solution pH, due to the presence of surface functional groups. The point of zero charge pH (pH_{PZC}) is the pH value at which the total net surface charge of an adsorbent is equal to zero. The pH_{PZC} for OPN was 6.73 ± 0.08. Therefore, at pH values below 6.73, the total net charge on the material surface was positive, favoring the electrostatic adsorption of anions, while at pH above that value, the net surface charge was negative, favoring the biosorption of cations such as Cd(II) and Pb(II).

In order to avoid Cd(II) or Pb(II) precipitation as hydroxide (Pereira et al., 2020), the influence of the initial pH of the solution was investigated up to pH 6.0 and 5.5 for Cd(II) and Pb(II), respectively.

3.2 Assays of Cd(II) and Pb(II) adsorption on OPN

3.2.1 Influence of pH in a single-component system

The solution pH is one of the most important variables to consider in the removal of inorganic contaminants by adsorbents, since it influences the charge of adsorption sites with pH-dependent charge, as well as affecting metal speciation (Pereira et al., 2020). For both cations, the removal capacity was lower at low pH values (pH <3), with the removal efficiency increasing as the pH increased, until maximum removal was reached at pH 5 (**Figure 6a**). This behavior was expected, since with increase of the solution pH, there would be deprotonation of acid groups on the OPN surface, with consequent removal of Cd(II) and Pb(II) cations by means of the interactions with negative charges or pairs of non-binding electrons from the neutral functional groups. Therefore, this study showed that for both cations, the highest removal percentages achieved using OPN were at pH 5.0, with removal efficiencies of 31% for Cd(II) and 85% for Pb(II).

It is important to highlight that pH 5.0 is lower than the pH_{PZC} value (6.73) of OPN. However, it should be noted that pH_{PZC} is the net total charge, and that even below this pH there would exist functional groups with negative or neutral charges above pH_{PZC} (due to their p*K*a values). These groups would be able to interact with Cd(II) and Pb(II), with the formation of outer- or inner-sphere complexes.

The behaviors observed for the removal of Pb(II) and Cd(II) as a function of solution pH were similar. However, the affinity of OPN for Pb(II) was greater than for Cd(II), which could be attributed to differences in their chemical properties such as ionic radius, hydrated radius, electronegativity, and Pearson's hardness (**Table 2**).

For two cations with the same charge, such as Pb(II) and Cd(II), the electrostatic interaction with the exchange sites will be more favorable for the cation with the smaller hydration radius (Jimenez et al., 2004). This could be observed for Pb(II), since it has a hydrated radius of 4.01 Å, while the hydrated radius of Cd(II) is 4.26 Å (Nightingale, 1959). For cations with larger hydrated radius, the center of cationic charge is located further away from the surface of the adsorbent (Chen et al., 2010). Hence, for this reason, the electrostatic interaction between the surface of the OPN and the Cd(II) ions was weaker.

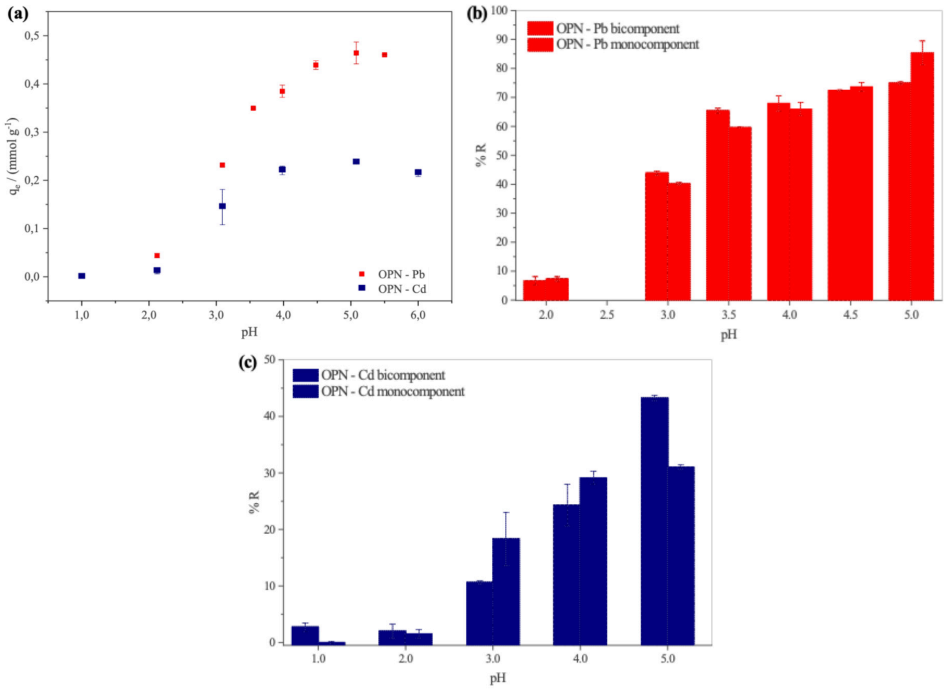


Figure 6. (a) Amounts (q_e) of Pb(II) and Cd(II) removed in a monocomponent system, and comparison of the percentage removals of (b) Pb(II) and (c) Cd(II) in monocomponent and bicomponent systems, as a function of the initial pH of the solution. Conditions: (26 ± 1) °C; 16 h; 130 rpm; 1.0 g L^{-1} of OPN; C_0 = 0.75 mmol L^{-1} for the monocomponent system; C_0 = 0.75 or 2.00 mmol L^{-1} for the bicomponent system.

Physicochemical properties	Cd	Pb	Reference
Ionic radius / Å	0.97	1.19	Castillo et al. (2017)
HSAB*	Soft acid	Intermediate acid	McBride (1994)
Pauling Electronegativity	1.7	1.9	Atkins and Jones (2010)
Hydrated radius / Å	4.26	4.01	Nightingale (1959)

* Hard Soft Acid Base theory of Pearson

Table 2. Physicochemical properties of Cd and Pb.

The lower biosorption of the Cd(II) ion could also have been related to its higher dehydration energy, compared to Pb(II), since the formation of a sphere complex requires the metallic cations to lose one or more molecules of hydration water (Sposito, 2008). Therefore, the lower the energy required for the metallic cation dehydration process to occur, the easier it is for biosorption of this species on the adsorbent surface (Petrus and Warchoł, 2003; Jimenez et al., 2004).

Electronegativity is another property to consider in comparison of the biosorption of Cd(II) and Pb(II). This property can be defined as the ability of an atom to attract electrons when it is part of a compound, meaning that the greater the electronegativity of an element, the greater is its force to attract an electron (Atkins and Jones, 2010). Hence, Pb (electronegativity of 1.9) had greater strength and capacity to attract electrons from species present on the surface of the adsorbent, compared to Cd (electronegativity of 1.7). The most electronegative metals must form the strongest covalent bonds with atoms possessing non-bonding electron pairs, such as oxygen. For the bivalent metals studied, the predicted order of bond preference would be Pb > Cd. On the other hand, based on electrostatics, the strongest bond must be formed by the metal with the highest charge-radius ratio. This would produce a different order of preference for the same metals: Cd > Pb (McBride, 1994). Hence, the results suggested an important contribution of covalent bonding for the biosorption of these elements.

The greater affinity of Pb(II) for the adsorbent could also be explained by the Hard-Soft Acid-Base theory of Pearson (1990). Given that Pb(II) is a harder acid than Cd(II), it has a greater affinity for binding to most of the functional groups present in organic matter, including carboxylic groups (McBride, 1994). Therefore, this factor makes Pb(II) preferable for biosorption/complexation reactions, with formation of internal sphere complexes, when compared to Cd(II) (McBride, 1994).

The preferential bonding of metal ions can also be explained by stereochemical effects, since larger ions can adapt more easily to binding sites with two distant functional groups (Papageorgiou et al., 2006). Therefore, since Pb(II) has a larger ionic radius (1.19 Å) than Cd(II) (0.97 Å), it is better accommodated at the binding sites of distant functional groups.

Castillo et al. (2017), who studied the use of chili seed residues for individual and competitive adsorption of Pb(II) and Cd(II), also observed preferential adsorption of Pb(II), compared to Cd(II). Adsorption studies using lignin-based compounds (Guo et al., 2008; Jiao et al., 2022; Santos et al., 2022) showed that this type of matrix has greater affinity for Pb(II) ions than for Cd(II) ions. This behavior was also observed by Appel et al. (2008), who investigated the biosorption sequence of Pb(II) and Cd(II) ions in three different tropical soils. Preferential retention of Pb(II), compared to Cd(II), was observed for the three soil types, irrespective of the order in which these metal ions were added to the system.

3.2.2 Influence of pH in a bicomponent system

The percentage removals of Pb(II) and Cd(II) showed increasing trends as the solution pH increased, for both monocomponent (**Figure 6b**) and bicomponent (**Figures 6c** and **6d**) systems. For Pb(II), up to pH 4.5, there was no significant difference between the removal percentages for the bicomponent and monocomponent systems (**Figure 6b**), demonstrating that the presence of Cd(II) did not influence the adsorption of Pb(II) on OPN. However, at pH 5.0, the presence of Cd(II) prevented Pb(II) adsorption. For Cd(II), from pH 3.0, the removal percentage differed significantly (*t*-test, 95% confidence) between the mono- and bicomponent systems (**Figure 6c**). At pH 3.0-4.0, the presence of Pb(II) prevented Cd(II) adsorption. This antagonistic effect was expected, due to competition of the cations for the same adsorption sites. According to Serrano et al. (2005), if two or more metal ions compete for the same types of biosorption sites, the adsorption of the more strongly bound metal ion forces the more weakly adsorbed metal to be adsorbed at lower energy active sites, such as exchange sites.

However, at pH 5.0, the adsorption of Cd(II) in the bicomponent system was greater than that in the monocomponent system, indicating a synergistic effect of the presence of Pb(II) on the adsorption of Cd(II). Cooperative adsorption has already been demonstrated for several metals susceptible to hydrolysis (Sposito, 2008).

Evaluation was also made of whether the initial concentration of Pb(II) and Cd(II) (0.75 mmol L^{-1}) was sufficiently high to promote competition between them, because at low adsorbate concentrations there was an excess of active sites available on the OPN surface, compared to the amount of cations in solution. Therefore, the assay was also carried out in a competition system (**Figure 7**) using a higher concentration (2.0 mmol L^{-1}) of the two cations.

When the higher concentration of both cations (2.0 mmol L^{-1}) was used, only Pb(II) was adsorbed on OPN, for all the pH values tested. Therefore, in the systems with lower concentrations of both cations, the ratio between the cation concentration (adsorbate) and the adsorption sites (adsorbent) was low, so there was no substantial competition between the two cations. On the other hand, at higher concentrations, the Cd(II) adsorption percentage was close to zero, since Pb(II) had higher affinity for the OPN adsorption sites, compared to Cd(II). This could be explained by the greater number of ions competing for binding sites available on the surface of the adsorbent material (Puranik and Paknikar, 1999).

These results confirmed the previous suggestion that OPN was selective towards Pb(II). Nonetheless, the percentage of adsorbed Pb(II), (32 ± 2)%, was lower than found for the monocomponent system, or even for the bicomponent system with a low concentration of contaminants (0.75 mmol L^{-1}), indicating that the presence of Cd(II) was able to inhibit the adsorption of Pb(II). For the bicomponent system with a low initial concentration of cations

(0.75 mmol L^{-1}), the maximum amounts of Cd(II) and Pb(II) removed were (0.232 ± 0.003) mmol g^{-1} and (0.344 ± 0.002) mmol g^{-1}, respectively (**Figure 7**). On the other hand, in the system with a higher concentration of cations (2 mmol L^{-1}), the maximum amounts of Pb(II) and Cd(II) removed were (0.64 ± 0.05) mmol g^{-1} and (0.04 ± 0.04) mmol g^{-1}, respectively.

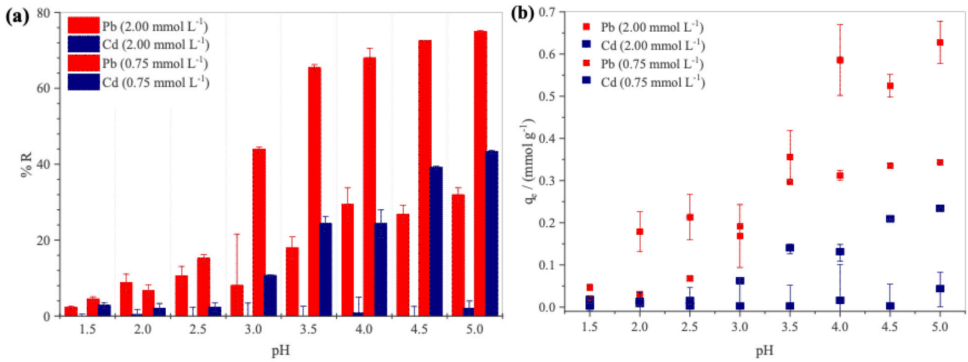


Figure 7. (a) Percentages and (b) amounts (q_e) of Pb(II) and Cd(II) ions removed in a bicomponent system, as a function of the initial pH of the solution. Conditions: (26 ± 1) °C; 16 h; 130 rpm; C_0 = 0.75 mmol L^{-1} or 2.0 mmol L^{-1}; 1.0 g L^{-1} of OPN.

The decrease of the adsorption capacity for the ions could be explained by the increase of the ionic strength of the solution, as observed by Low et al. (2000), who studied the adsorption of the same cations by a biomass residue from the brewing industry. Such behavior has also been reported for other types of biosorbents, such as algae biomass (He and Chen, 2014), oilseed husks (Pehlivan et al., 2009), mineral adsorbents (Chen et al., 2011), and soils (McBride, 1994).

The pH studies showed that for both metals, the maximum adsorption capacity was obtained at pH 5.0. Therefore, pH 5.0 was established as the optimal pH (for the studied experimental conditions) and was used for the equilibrium experiment (**Section 3.2.2**).

The adsorption capacity of OPN at pH 5.0 (q_e = 95 mg g^{-1} for Pb(II) and q_e = 27 mg g^{-1} for Cd(II)) was higher than the maximum adsorption capacities reported for many natural biosorbents and even for some modified biosorbents (**Table 3**).

The OPN biosorbent could be produced according to a very simple and green process, with no need for chemical modification, and presented a high adsorption capacity for Cd(II) and Pb(II). This shows the great advantage of OPN, compared to modified absorbents, because although chemical modification of biomass is a common method used to improve biosorbent adsorption capacity, it must be efficient, low cost, and not generate secondary pollution (Maia et al., 2021), which may be difficult to achieve in practice.

3.3 OPN reuse evaluation

The desorption efficiencies for Cd(II) and Pb(II) using different desorption solutions are shown in **Figure 8.** The desorption study was important for evaluation of the forces

involved in the interactions of Pb(II) and Cd(II) with the OPN adsorption sites, as well as for identification of the best desorption solution to be used for OPN reuse in further adsorption cycles.

Deionized water removed a small amount of Pb(II), (11.6 ± 0.6)%, but a substantial amount of Cd(II), (57.8 ± 0.2)%, due to the ability of deionized water to only remove those ions bonded to the adsorbent by Van der Waals interactions. The $NaNO_3$ solution also showed higher efficiency for desorption of Cd(II) ((66.9 ± 0.8)%), compared to Pb(II) ((37.1 ± 0.6)%). This solution was able to remove cations adsorbed on exchange sites by electrostatic interaction.

The highest desorption percentages were achieved using HNO_3 solution as eluent ((99.5 ± 0.2)% for Cd(II) and (89 ± 3)% for Pb(II)). Under acidic conditions, H^+ ions protonate the surface of the adsorbent, replacing the metallic ions adsorbed on the surface, leading to desorption of adsorbed species such as positively charged metal ions (Karthikeyan et al., 2007), including those in non-exchangeable form (McBride, 1989). These results indicated that HNO_3 solution was a suitable eluent for the recovery of adsorbed metal cations, enabling the adsorbent material to be reused in further cycles of cation removal.

For all the desorption solutions, the desorption efficiency was higher for Cd(II) than for Pb(II). This corroborated the results of the adsorption assays suggesting that Pb(II) adsorption occurred at higher energy sites, compared to the adsorption of Cd(II).

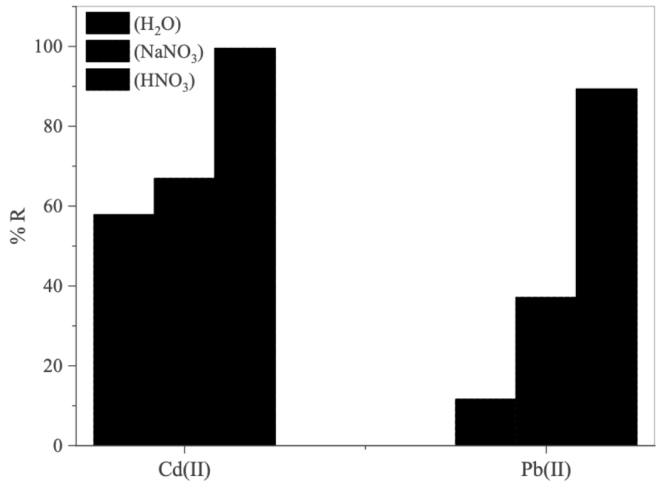


Figure 8. Desorption efficiencies for removal of Cd(II) and Pb(II) from OPN, using different desorption solutions. Conditions: T = (26 ± 1) °C; contact time = 16 h; agitation speed = 130 rpm; 1.0 g L^{-1} of OPN.

Biosorbent	Q_{max} [1] / mg g^{-1}		pH	Dosage / g L^{-1}	Temperature / °C	Agitation speed / rpm	Reference
	Cd(II)	Pb(II)					
Papaya peel	-	38.31	5.0	5	-	150	(Abbaszadeh et al., 2016)
Seaweed Posidonia oceanica fibers	100	100	6.0	5	40	300	(Boulaiche et al., 2019)
Kiwi branch biochar	-	161.2	5.5	0.8	30	200	(Tan et al., 2022)
Modified baker's yeast (*Saccharomyces cerevesiae*)	32.26	200	5.0	1	25	150	(Dutta et al., 2016)
Modified *Syzygium cumini* leave	57.14	109.8	6.0 Cd(II) 7.0 Pb(II)	5	> 40	180	(Salman et al., 2020)
Modified residues of *Anacardium occidentale* L.	12.5	27.1	5.0	4	25	200	(Coelho et al., 2018)
Cashew nut shell (*Anarcadium occidentale* L.)	11.2	28.6	5.0	12	25	200	(Coelho et al., 2014)
Jatoba (Hymenaea courbaril) fruit shell	30.27	48.75	5.5 Pb(II) 4.0 Cd(II)	5.0	"room temperature"	180	(Souza et al., 2017)
Modified banana stalk	6.738	59.39	-	20	25	175	(Mahmood-ul-Hassan et al., 2015)
Modified corn cob	19.86	56.67	-	20	25	175	(Mahmood-ul-Hassan et al., 2015)
Modified sunflower achene	16.282	39.23	-	20	25	175	(Mahmood-ul-Hassan et al., 2015)
Moringa oilefera leaves	16.13	45.83	6.0	10	25	150	(Abatal et al., 2021)
Moringa oilefera seeds	4.97	49.50	6.0	10	25	150	(Abatal et al., 2021)
Pennisetum glaucumcomo	5.55	15.24	6.0	2	25	125	(Yousaf et al., 2017)

[1] From Langmuir isotherm.

Table 3. Comparison of the OPN and different biosorbents reported in the literature for removal of Cd(II) and Pb(II) from aqueous solutions.

4 I CONCLUSIONS

P. aculeata leaf was successfully used to produce a green and low-cost biosorbent (OPN) with high adsorption capacities for Cd(II) and Pb(II), which exceeded those of

many similar biosorbents reported in the literature, including adsorbents produced using chemical modification. This showed the great advantage of OPN, since excellent results were achieved without any requirement for chemical modification. The best Pb(II) and Cd(II) removal efficiencies were obtained at pH 5, with OPN presenting greater affinity for Pb(II) than for Cd(II). The material could be reused after desorption using 0.10 mol L^{-1} HNO_3 solution, which provided desorption efficiencies of (99.5 ± 0.2)% for Cd(II) and (89 ± 3)% for Pb(II).

CREDIT AUTHORSHIP CONTRIBUTION STATEMENT

Josiane Lopes de Oliveira: Conceptualization, Methodology, Software, Formal analysis, Investigation, Visualization, Writing - original draft. **Emylle Emediato Santos:** Formal analysis, Investigation. **Liliane Catone Soares:** Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Writing - review & editing. **Roberta Eliane Santos Froes:** Conceptualization, Writing - review & editing, Funding acquisition, Supervision, Project administration.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors are grateful to Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) and Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG, grant number APQ 01974-17.

REFERENCES

Abatal, M., Olguin, M.T., Anastopoulos, I., Giannakoudakis, D.A., Lima, E.C., Vargas, J., Aguilar, C., 2021. Comparison of Heavy Metals Removal from Aqueous Solution by *Moringa oleifera* Leaves and Seeds. Coatings 11, 508. https://doi.org/10.3390/coatings11050508

Abbaszadeh, S., Wan Alwi, S.R., Webb, C., Ghasemi, N., Muhamad, I.I., 2016. Treatment of lead-contaminated water using activated carbon adsorbent from locally available papaya peel biowaste. J. Clean. Prod. 118, 210–222. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.054

Aburto, J., Moran, M., Galano, A., Torres-García, E., 2015. Non-isothermal pyrolysis of pectin: A thermochemical and kinetic approach. J. Anal. Appl. Pyrolysis 112, 94–104. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.02.012

Appel, C., Ma, L.Q., Rhue, R.D., Reve, W., 2008. Sequential sorption of lead and cadmium in three tropical soils. Environ. Pollut. 155, 132–140. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.10.026

Atkins, P., Jones, L., 2010. Chemical Principles: The Quest for Insight, 5th ed. New York.

ATSDR, 2019. Substance Priority List. Agency Toxic Subst. Dis. Regist. URL https://www.atsdr.cdc.gov/spl/index.html#2019spl

Boulaiche, W., Belhamdi, B., Hamdi, B., Trari, M., 2019. Kinetic and equilibrium studies of biosorption of M(II) (M = Cu, Pb, Ni, Zn and Cd) onto seaweed *Posidonia oceanica* fibers. Appl. Water Sci. 9, 173. https://doi.org/10.1007/s13201-019-1062-1

Bulgariu, D., Bulgariu, L., 2016. Potential use of alkaline treated algae waste biomass as sustainable biosorbent for clean recovery of cadmium(II) from aqueous media: Batch and column studies. J. Clean. Prod. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.124

Butterworth, C.A., Wallace, R.S., 2005. Molecular Phylogenetics of the Leafy Cactus Genus *Pereskia* (*Cactaceae*). Syst. Bot. 30, 800–808. https://doi.org/10.1600/036364405775097806

Castillo, N.A.M., Ortega, E.P., Martínez, M.C.R., Ramos, R.L., Pérez, R.O., Alvarez, C.C., 2017. Single and competitive adsorption of Cd(II) and Pb(II) ions from aqueous solutions onto industrial chili seeds (*Capsicum annuum*) waste. Sustain. Environ. Res. 27, 61–69. https://doi.org/10.1016/j.serj.2017.01.004

Chen, S.B., Ma, Y.B., Chen, L., Xian, K., 2010. Adsorption of aqueous Cd^{2+}, Pb^{2+}, Cu^{2+} ions by nano-hydroxyapatite: Single and multi-metal competitive adsorption study. Geochem. J. 44, 233–239. https://doi.org/10.2343/geochemj.1.0065

Chen, Y.-G., Ye, W.-M., Yang, X.-M., Deng, F.-Y., He, Y., 2011. Effect of contact time, pH, and ionic strength on Cd(II) adsorption from aqueous solution onto bentonite from Gaomiaozi, China. Environ. Earth Sci. 64, 329–336. https://doi.org/10.1007/s12665-010-0850-6

Cheng, S., Liu, Y., Xing, B., Qin, X., Zhang, C., Xia, H., 2021. Lead and cadmium clean removal from wastewater by sustainable biochar derived from poplar saw dust. J. Clean. Prod. 314, 128074. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128074

Coelho, G.F., Gonçalves, A.C., Schwantes, D., Rodríguez, E.Á., Tarley, C.R.T., Dragunski, D., Conradi Junior, É., 2018. Removal of Cd(II), Pb(II) and Cr(III) from water using modified residues of *Anacardium occidentale* L. Appl. Water Sci. 8, 1–21. https://doi.org/10.1007/s13201-018-0724-8

Coelho, G.F., Gonçalves, A.C., Tarley, C.R.T., Casarin, J., Nacke, H., Franczisko wski, M.A., 2014. Removal of metal ions Cd (II), Pb (II), and Cr (III) from water by the cashew nut shell *Anacardium occidentale* L. Ecol. Eng. 73, 514-525. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.09.103

Cruz, T.M., Santos, J.S., do Carmo, M.A.V., Hellström, J., Pihlava, J.M., Azevedo, L., Granato, D., Marques, M.B., 2021. Extraction optimization of bioactive compounds from ora-pro-nobis (*Pereskia aculeata* Miller) leaves and their in vitro antioxidant and antihemolytic activities. Food Chem. 361, 130078. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130078

Dutta, A., Zhou, L., Castillo-Araiza, C.O., De Herdt, E., 2016. Cadmium(II), Lead(II), and Copper(II) Biosorption on Baker's Yeast (*Saccharomyces cerevesiae*). J. Environ. Eng. 142, 1–7. https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001041

Elias, M.M.C., Soares, L.C., Maia, L.C., Dias, M.V.L., Gurgel, L.V.A., 2022. Multivariate optimization applied to the synthesis and reuse of a new sugarcane bagasse-based biosorbent to remove Cd(II) and Pb(II) from aqueous solutions. Environ. Sci. Pollut. Res. https://doi.org/10.1007/s11356-022-18654-9

Fomina, M., Gadd, G.M., 2014. Biosorption: Current perspectives on concept, definition and application. Bioresour. Technol. 160, 3–14. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.102

Guo, X., Zhang, S., Shan, X., 2008. Adsorption of metal ions on lignin. J. Hazard. Mater. 151, 134–142. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.05.065

He, J., Chen, J.P., 2014. A comprehensive review on biosorption of heavy metals by algal biomass: Materials, performances, chemistry, and modeling simulation tools. Bioresour. Technol. 160, 67–78. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.068

Jiao, G.-J., Ma, J., Li, Y., Jin, D., Zhou, J., Sun, R., 2022. Removed heavy metal ions from wastewater reuse for chemiluminescence: Successive application of lignin-based composite hydrogels. J. Hazard. Mater. 421, 126722. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126722

Jimenez, R.S., Dal Bosco, S.M., Carvalho, W.A., 2004. Remoção de metais pesados de efluentes aquosos pela zeólita natural escolecita - influência da temperatura e do pH na adsorção em sistemas monoelementares. Quim. Nova 27, 734–738. https://doi.org/10.1590/S0100-40422004000500011

Jones, B.O., John, O.O., Luke, C., Ochieng, A., Bassey, B.J., 2016. Application of mucilage from *Dicerocaryum eriocarpum* plant as biosorption medium in the removal of selected heavy metal ions. J. Environ. Manage. 177, 365–372. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.04.011

Karthikeyan, S., Balasubramanian, R., Iyer, C.S.P., 2007. Evaluation of the marine algae *Ulva fasciata* and *Sargassum* sp. for the biosorption of Cu(II) from aqueous solutions. Bioresour. Technol. 98, 452–455. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.01.010

Kim, H.S., Kim, Y.J., Seo, Y.R., 2015. An Overview of Carcinogenic Heavy Metal: Molecular Toxicity Mechanism and Prevention. J. Cancer Prev. 20, 232–240. https://doi.org/10.15430/jcp.2015.20.4.232

Klemm, D., Philipp, B., Heinze, T., Heinze, U., Wagenknecht, W., 1998. Comprehensive Cellulose Chemistry: Functionalization of Cellulose. New York: Wiley-VCH.

Li, Q., Song, H., Han, R., Wang, G., Li, A., 2019. Efficient removal of Cu(II) and citrate complexes by combined permanent magnetic resin and its mechanistic insights. Chem. Eng. J. 366, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.02.070

Low, K., Lee, C., Liew, S., 2000. Sorption of cadmium and lead from aqueous solutions by spent grain. Process Biochem. 36, 59–64. https://doi.org/10.1016/S0032-9592(00)00177-1

Maciel, V.B.V., Yoshida, C.M.P., Boesch, C., Goycoolea, F.M., Carvalho, R.A., 2020. Iron-rich chitosan-pectin colloidal microparticles laden with ora-pro-nobis (*Pereskia aculeata* Miller) extract. Food Hydrocoll. 98, 105313. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105313

Maciel, V.B.V., Yoshida, C.M.P., Goycoolea, F.M., 2018. Agronomic Cultivation, Chemical Composition, Functional Activities and Applications of *Pereskia* Species – A Mini Review. Curr. Med. Chem. 26, 4573–4584. https://doi.org/10.2174/0929867325666180926151615

Mahmood-ul-Hassan, M., Suthor, V., Rafique, E., Yasin, M., 2015. Removal of Cd, Cr, and Pb from aqueous solution by unmodified and modified agricultural wastes. Environ. Monit. Assess. 187, 19. https://doi.org/10.1007/s10661-014-4258-8

Maia, L.C., Soares, L.C., Alves Gurgel, L.V., 2021. A review on the use of lignocellulosic materials for arsenic adsorption. J. Environ. Manage. 288, 112397. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112397

Marques Neto, J. de O., Bellato, C.R., Milagres, J.L., Pessoa, K.D., Alvarenga, E.S. de, 2013. Preparation and evaluation of chitosan beads immobilized with Iron(III) for the removal of As(III) and As(V) from water. J. Braz. Chem. Soc. 24, 121–132. https://doi.org/10.1590/S0103-50532013000100017

Martin, A.A., de Freitas, R.A., Sassaki, G.L., Evangelista, P.H.L., Sierakowski, M.R., 2017. Chemical structure and physical-chemical properties of mucilage from the leaves of *Pereskia aculeata*. Food Hydrocoll. 70, 20–28. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.03.020

McBride, M.B., 1994. Environmental Chemistry of Soils. New York: Oxford University Press. https://doi.org/10.2134/jeq1995.00472425002400010029x

McBride, M.B., 1989. Reactions Controlling Heavy Metal Solubility in Soils. In: Advances in Soil Science. New Brunswick, pp. 1–56. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-8847-0_1

Mi, X., Huang, G., Xie, W., Wang, W., Liu, Y., Gao, J., 2012. Preparation of graphene oxide aerogel and its adsorption for Cu2+ ions. Carbon N. Y. 50, 4856–4864. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.06.013

Neves, I.C.O., Rodrigues, A.A., Valentim, T.T., Meira, A.C.F. de O., Silva, S.H., Alcântara, L.A., de Resende, J.V., 2020. Amino acid-based hydrophobic affinity cryogel for protein purification from ora-pro-nobis (*Pereskia aculeat*a Miller) leaves. J. Chromatogr. B 1161, 122435. https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2020.122435

Nightingale, E.R., 1959. Phenomenological Theory of Ion Solvation. Effective Radii of Hydrated Ions. J. Phys. Chem. 63, 1381–1387. https://doi.org/10.1021/j150579a011

Noh, J.S., Schwarz, J.A., 1990. Effect of HNO_3 treatment on the surface acidity of activated carbons. Carbon N. Y. 28, 675–682. https://doi.org/10.1016/0008-6223(90)90069-B

Oliveira, N.L., Rodrigues, A.A., Oliveira Neves, I.C., Teixeira Lago, A.M., Borges, S.V., de Resende, J.V., 2019. Development and characterization of biodegradable films based on *Pereskia aculeata* Miller mucilage. Ind. Crops Prod. 130, 499–510. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.01.014

Papageorgiou, S.K., Katsaros, F.K., Kouvelos, E.P., Nolan, J.W., Le Deit, H., Kanellopoulos, N.K., 2006. Heavy metal sorption by calcium alginate beads from *Laminaria digitata*. J. Hazard. Mater. 137, 1765–1772. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.05.017

Pavia, D.L., Lampman, G.M., Kriz, G.S., 2014. Introduction to Spectroscopy, 5th edition. Thomson Learning, Inc.

Pearson, R.G., 1990. Hard and soft acids and bases - the evolution of a chemical concept. Coord. Chem. Rev. 100, 403–425. https://doi.org/10.1016/0010-8545(90)85016-L

Pehlivan, E., Altun, T., Cetin, S., Iqbal Bhanger, M., 2009. Lead sorption by waste biomass of hazelnut and almond shell. J. Hazard. Mater. 167, 1203–1208. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.01.126

Pereira, A.R., Soares, L.C., Teodoro, F.S., Elias, M.M.C., Ferreira, G.M.D., Savedra, R.M.L., Siqueira, M.F., Martineau-Corcos, C., da Silva, L.H.M., Prim, D., Gurgel, L.V.A., 2020. Aminated cellulose as a versatile adsorbent for batch removal of As(V) and Cu(II) from mono- and multicomponent aqueous solutions. J. Colloid Interface Sci. 576, 158–175. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.04.129

Petrus, R., Warchoł, J., 2003. Ion exchange equilibria between clinoptilolite and aqueous solutions of Na^+/Cu^{2+}, Na^+/Cd^{2+} and Na^+/Pb^{2+}. Micropor. Mesopor. Mat. 61, 137–146. https://doi.org/10.1016/S1387-1811(03)00361-5

Puranik, P.R., Paknikar, K.M., 1999. Biosorption of Lead, Cadmium, and Zinc by Citrobacter Strain MCM B-181: Characterization Studies. Biotechnol. Prog. 15, 228–237. https://doi.org/10.1021/bp990002r

Salman, S.M., Muhammad, S., e Shahwar, D., Iqbal, M., Aijaz, M., Siddique, M., Ali, A., Nawaz, S., Kamran, A.W., 2020. Biosorption of Pb(II) and Cd(II) ions from aqueous solution by chemically modified *Syzygium cumini* leaves and its equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. Pakistan J. Sci. Ind. Res. Ser. A Phys. Sci. 63, 18–29. https://doi.org/10.52763/pjsir.phys.sci.63.1.2020.18.29

Santos, T.J., Paggiaro, J., Cabral Silva Pimentel, H.D., Karla dos Santos Pereira, A., Cavallini, G.S., Pereira, D.H., 2022. Computational study of the interaction of heavy metal ions, Cd(II), Hg(II), and Pb(II) on lignin matrices. J. Mol. Graph. Model. 111, 108080. https://doi.org/10.1016/j.jmgm.2021.108080

Serrano, S., Garrido, F., Campbell, C.G., Garcıa-González, M.T., 2005. Competitive sorption of cadmium and lead in acid soils of Central Spain. Geoderma 124, 91–104. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.04.002

Souza, I.P.A.F., Cazetta, A.L., Pezoti, O., Almeida, V.C., 2017. Preparation of biosorbents from the Jatoba (*Hymenaea courbaril*) fruit shell for removal of Pb(II) and Cd(II) from aqueous solution. Environ. Monit. Assess. 189, 632. https://doi.org/10.1007/s10661-017-6330-7

Sposito, G., 2008. The Chemistry of Soils, 2nd ed.. New York: Oxford University Press.

Tan, Y., Wan, X., Zhou, T., Wang, L., Yin, X., Ma, A., Wang, N., 2022. Novel Zn-Fe engineered kiwi branch biochar for the removal of Pb(II) from aqueous solution. J. Hazard. Mater. 424, 127349. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127349

Teodoro, F.S., Ramos, S.N. do C., Elias, M.M.C., Mageste, A.B., Ferreira, G.M.D., da Silva, L.H.M., Gil, L.F., Gurgel, L.V.A., 2016. Synthesis and application of a new carboxylated cellulose derivative. Part I: Removal of Co^{2+}, Cu^{2+} and Ni^{2+} from monocomponent spiked aqueous solution. J. Colloid Interface Sci. 483, 185–200. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.08.004

Vanhoudt, N., Vandenhove, H., Leys, N., Janssen, P., 2018. Potential of higher plants, algae, and cyanobacteria for remediation of radioactively contaminated waters. Chemosphere 207, 239–254. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.034

Volesky, B., 2001. Detoxification of metal-bearing effluents: Biosorption for the next century. Hydrometallurgy 59, 203–216. https://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00160-2

Yousaf, A., Athar, M., Salman, M., Farooq, U., Chawla, F.S., 2017. Biosorption characteristics of *Pennisetum glaucum* for the removal of Pb(II), Ni(II) and Cd(II) ions from aqueous medium. Green Chem. Lett. Rev. 10, 462–470. https://doi.org/10.1080/17518253.2017.1402093

Zhao, G., 2011. Sorption of Heavy Metal Ions from Aqueous Solutions: A Review. Open Colloid Sci. J. 4, 19–31. https://doi.org/10.2174/1876530001104010019

Zhou, Z., Xu, Z., Feng, Q., Yao, D., Yu, J., Wang, D., Lv, S., Liu, Y., Zhou, N., Zhong, M.-e., 2018. Effect of pyrolysis condition on the adsorption mechanism of lead, cadmium and copper on tobacco stem biochar. J. Clean. Prod. 187, 996–1005. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.268

CAPÍTULO 9

SÍNTESE DE MATERIAIS ADSORVENTES A PARTIR DE CAULIM

Data de submissão: 09/06/2023 *Data de aceite: 03/07/2023*

Rian Cristian Douro Amorim
Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Química (Campus Belém)
Belém – Pará
http://lattes.cnpq.br/8957051851081842

Antônio Lucas Alcantara Modesto
Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Química (Campus Belém)
Belém– Pará
http://lattes.cnpq.br/4728233493323449

Alex Gabriel Oliveira Ruivo
Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Química (Campus Belém)
Belém – Pará

Mailson Batista de Vilhena
Universidade federal do Pará, Faculdade de Engenharia Química (Campus Belém)
Belém – Pará
http://lattes.cnpq.br/0383588164193085

Dilson Nazareno Pereira Cardoso
Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Química (Campus Belém)
Belém – Pará
http://lattes.cnpq.br/1711061955509303

Josiel Lobato Ferreira
Universidade Federal do Pará, faculdade de Engenharia química (Campus Belém)
Belém – Pará
http://lattes.cnpq.br/0187722217624180

Bruno Marques Viegas
Universidade Federal do Pará, Faculdade de Biotecnologia (Campus Belém)
Belém – Pará
http://lattes.cnpq.br/1196600058247902

Deibson Silva da Costa
Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia de Materiais(Campus Ananindeua)
Belém – Pará
http://lattes.cnpq.br/1521124351431087

José Antônio Silva da Souza
Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Química (Campus Belém)
Belém – Pará
http://lattes.cnpq.br/6157348947425968

Emanuel Negrão Macêdo
Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Química (Campus Belém)
Belém – Pará
http://lattes.cnpq.br/8718370108324505

Diego Cardoso Estumano
Universidade Federal do Pará, Faculdade de Biotecnologia (Campus Belém)
Belém – Pará
http://lattes.cnpq.br/5521162828533153

Emerson Cardoso Rodrigues
Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Química (Campus Belém)
Belém – Pará
http://lattes.cnpq.br/7459428211048580

RESUMO: O presente trabalho objetivou sintetizar zeólitas a partir do caulim de enchimento e aplica-los em ensaios de adsorção de umidade. O Caulim foi calcinado à 700ºC por duas horas para sua transformação em metacaulim. Após a calcinação, o metacaulim foi introduzido em um balão, disposto em manta, acoplada ao termopar regulado para temperatura de 100ºC. A frequência do agitador foi de 700 RPM e a síntese ocorreu em 30 minutos. Para a adsorção, foi utilizado um recipiente fechado contendo 5 gramas das zeólitas dispostas em um cadinho e ao redor, encheu-se o recipiente de água a fim de verificar o teor de umidade absorvido pela amostra durante os tempos adotados pela metodologia. Na metodologia analítica, o material de partida, intermediário e as zeólitas sintetizadas foram caracterizados por meio do MEV e DRX. Para a adsorção de umidade, foi desenvolvido um gráfico que dispõe da média da porcentagem de adsorção (duplicata) em função do tempo. Através dos resultados ao MEV e ao DRX, o caulim apresentou-se como matéria prima viável para síntese de zeólitas. Em relação aos ensaios de adsorção, pode-se afirmar que as zeólitas do presente trabalho foram eficientes na adsorção de umidade nos tempos adotados pela metodologia. Ressalta-se um potencial de adsorção ainda maior.
PALAVRAS-CHAVE: Resíduo, minerais, adsorção, metacaulim, zeólitas.

SYNTHESIS OF ADSORBENT MATERIALS FROM KAOLIN

ABSTRACT: The present work aimed to synthesize zeolites from kaolin filler and apply them in moisture adsorption tests. Kaolin was calcined at 700ºC for two hours for its transformation into metakaolin. After calcination, the metakaolin was introduced into a flask, arranged on a blanket, coupled to a thermocouple set at a temperature of 100ºC. The agitator frequency was 700 RPM and the synthesis took place in 30 minutes. For the adsorption, a closed container was used containing 5 grams of zeolites placed in a crucible and around it, the container was filled with water in order to check the moisture content absorbed by the sample during the times adopted by the methodology. In the analytical methodology, the starting material, intermediate and synthesized zeolites were characterized by means of scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD). For the adsorption of moisture, a graph was developed that provides the average of the percentage of adsorption (duplicate) as a function of time. Through the results of SEM and XRD, kaolin presented itself as a viable raw material for synthesis of zeolites. In relation to the adsorption tests, it can be affirmed that the zeolites of this work were efficient in the adsorption of moisture in the times adopted by the methodology. It is emphasized an even greater potential for adsorption.
KEYWORDS: Waste, minerals, adsorption, metakaolin, zeolites.

1 | INTRODUÇÃO

A zeólita é um mineral cuja sua composição é dada basicamente por silicatos hidratados de alumínio, possui estrutura cristalina e apresentam uma enorme quantidade de micro poros bem definidos em sua estrutura. As zeólitas dispõem de cavidades e canais interconectados, os quais apresentam íons de compensação (Gama, 2012). Os micro poros, que se fazem presentes na estrutura das zeólitas, são capazes de adsorver o ar, água e outros tipos de íons. Por conta de seu alto perfil adsorvente, as zeólitas são conhecidas, pela IUPAC, como peneira molecular.

O caulim é um mineral argiloso composto essencialmente por caulinita e haloisita. Embora, a caulinita seja o principal constituinte do caulim, outros elementos além do alumínio, silício, oxigênio e hidrogênio encontram-se geralmente presente na forma mais complexa e por vezes, desconhecida (Mártires, 2009). Em 2021, o Pará deteve os títulos de maior produtor e maior exportador nacional de caulim, e oitavo maior produtor de caulim do mundo (Assunção, 2021). O caulim é muito requisitado para produção de zeólitas por conta de sua fonte natural de alumínio e silício (Pinheiro et al. 2020). A síntese a partir do caulim pode ser feita utilizando basicamente duas etapas, são elas: Calcinação do caulim e síntese hidrotermal de zeólitas.

Os objetivos do presente trabalho são: sintetizar material zeolítico (zeólitas A), utilizando o caulim de enchimento como material de partida, para realizar ensaios de adsorção com as zeólitas sintetizadas. Ademais, pretende-se caracterizar os matérias de partida, intermediário e finais a partir de análises morfológicas e mineralógicas.

2 | METODOLOGIA

2.1 Procedimentos experimentais

A metodologia experimental foi dividida nas etapas de síntese de zeólitas e aplicação do material zeolítico sintetizado em ensaios de adsorção de umidade. A síntese de síntese de zeólitas a partir do caulim de enchimento e por via hidrotermal foi dividida em basicamente três etapas, são elas: calcinação do caulim de enchimento e sintetização de zeólita 4A em sistema dinâmico e por fim, a filtração e secagem das zeólitas sintetizadas.

Calcinação do caulim: Na calcinação, o caulim de enchimento foi pesado e submetido ao forno, tipo mufla, com uma temperatura de 700 ºC durante duas horas, desta maneira, possibilitando a desidroxilação do material de partida, transformando o caulim de enchimento em metacaulim.

Processo de síntese: Para o processo de síntese, foi pesado 150 gramas de metacaulim, produzido na calcinação e a solução de hidróxido de sódio (NaOH) 5 molar, o que fornece uma relação Al/Na igual a 0,57. Após a pesagem, o material foi submetido à um balão de 3 litros, o qual estava acoplado em uma manta aquecedora e em um agitador. O

termopar, aparelho que mede e regula a temperatura da manta aquecedora, foi designado para aproximadamente 100 ºC e o agitador para uma frequência de 700 RPM.

Filtração do produto: Após a síntese de zeólitas 4A, o produto obtido, por apresentar um pH maior que o pH neutro (pH desejado para cessar a reação de síntese), precisou ser filtrado com água destilada, e ao seu término, a zeólita foi seca na estufa durante 24 horas.

Ensaios de adsorção: O material zeolítico sintetizado foi calcinado durante duas horas sob temperatura de 400 graus celsius em mufla, para dar início aos ensaios de adsorção. Para os ensaios de adsorção foi utilizado um recipiente fechado, o qual continha 5 gramas do material zeolítico sintetizado (Após calcinação à 400 graus por duas horas) disposto em um cadinho e ao redor, encheu-se o recipiente de água a fim de verificar o teor de umidade absorvido pela amostra durante os respectivos tempos: 2, 4, 6, 8, 24, 30, 48, 72, 120, 168 e 216 horas.

2.2 Procedimentos analíticos

Para a adsorção, utilizou-se um gráfico que dispõe da média da porcentagem de adsorção (duplicata) em função do tempo em horas.

Análises mineralógicas: As análises para a composição mineralógica dos materiais de partida, materiais intermediários e as zeólitas A foram obtidas por meio da difração de raios X (DRX); sendo as análises feitas no Difratômetro de Raios X modelo Empyrean da PANalytical, tubos de raios-X cerâmico de anodo de Co ($K_{\alpha 1}$= 1,789010 Å), foco fino longo, filtro K_{β} de Fe, detector PIXCEL3D-Medpix3 1x1, no modo scanning, com voltagem de 40 kV, corrente de 35mA. Fenda divergente: 1/4° e anti-espalhamento: 1/2°, máscara: 10 mm.

Análises morfológicas: As análises morfológicas foram obtidas a partir da microscopia eletrônica de varredura (MEV), sendo os dados obtidos pelo microscópio de bancada, da Hitachi, modelo TM3000. As imagens foram geradas por elétrons secundários com voltagens de 5 kV.

3 I RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Difração de Raios X (DRX)

A Figura 1 apresenta o difratograma do material de partida (caulim de enchimento), a partir do qual é possível observar que o caulim de enchimento utilizado na síntese é constituído essencialmente por caulinita (K) e dispõe de 2 picos principais: 7,15 Å e 3,57 Å. Por apresentar picos no difratograma, confirma-se a fase cristalina do caulim. O caulim de enchimento apresentou a caulinita como fase primária e o quartzo como fase secundária, tais resultados entram em consenso com o trabalho de (Farias, 2020).

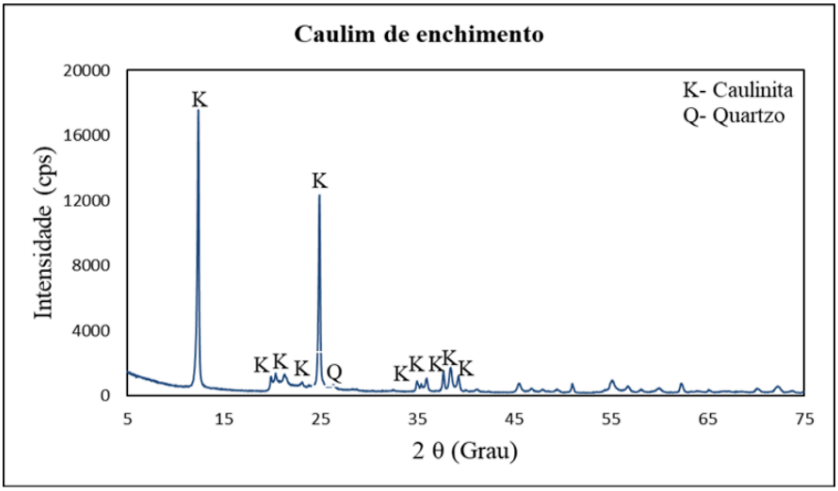


Figura 1 – Difratograma do caulim de enchimento.

A Figura 2 apresenta o difratograma do metacaulim, que comparado ao difratograma do caulim, apresenta a exclusão dos picos de caulinita, demonstrando que a calcinação foi satisfeita, ou seja, a transformação da caulinita em metacaulinita. Na temperatura e tempo utilizado na presente calcinação, ainda se observa um pequeno pico de quartzo.

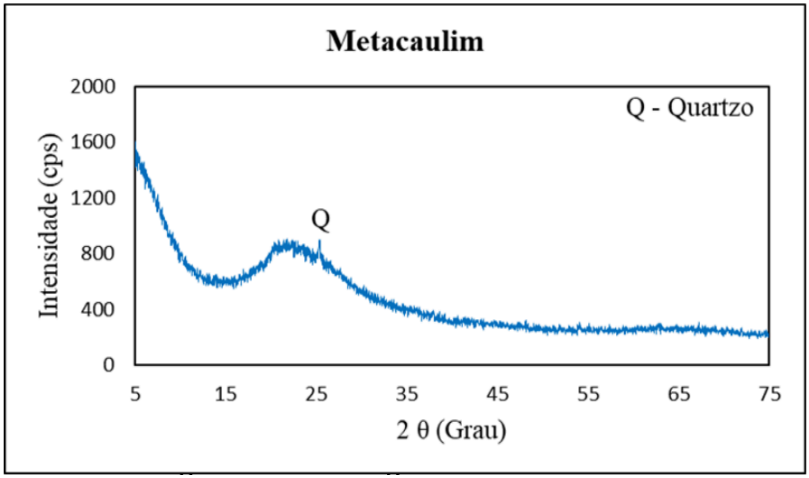


Figura 2 – Difratograma do metacaulim.

Na Figura 3 tem-se o difratograma das zeólitas sintetizadas a partir do metacaulim, o qual apresenta vários picos cristalinos, estes sendo característicos das zeólitas do tipo A. tais resultados são semelhantes ao de Rodrigues (2019), o qual utilizou o caulim de enchimento para sintetizar zeólitas do tipo A.

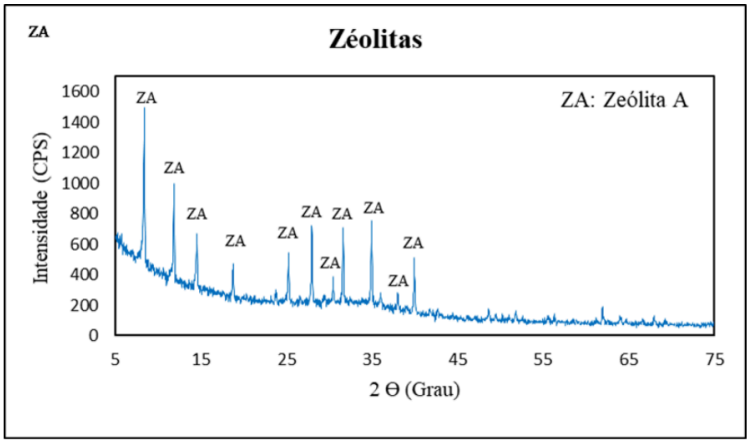


Figura 3 – difratograma das zeólitas sintetizadas.

3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A micrografia do caulim de enchimento apresentou uma aglomeração de partículas conforme esperado de acordo com a literatura, mostrando uma morfologia pseudo-hexagonal das mesmas na Figura 4, confirmando o trabalho de Rodrigues (2019).

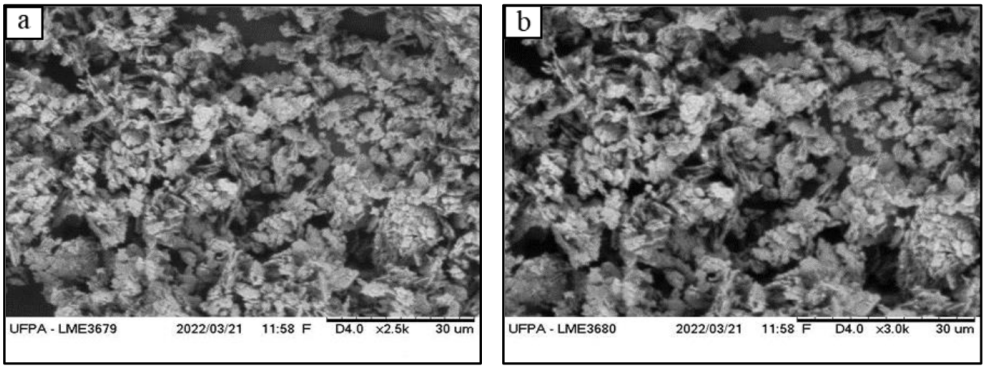


Figura 4 – Imagens ao MEV do caulim de enchimento.

Microscopia eletrônica de varredura do Metacaulim, o qual foi obtido a partir da calcinação do caulim de enchimento à 700 °C por duas horas e pode ser observado a partir da Figura 5, apresenta uma morfologia que difere ao do caulim de enchimento, o metacaulim tem como característica sua estrutura amorfa, ou seja, possui poucos cristais em sua morfologia, já o caulim de enchimento é caracterizado pelo o aparecimento de cristais em sua estrutura, conforme visto também por Muñiz-Villareal et al. 2011).

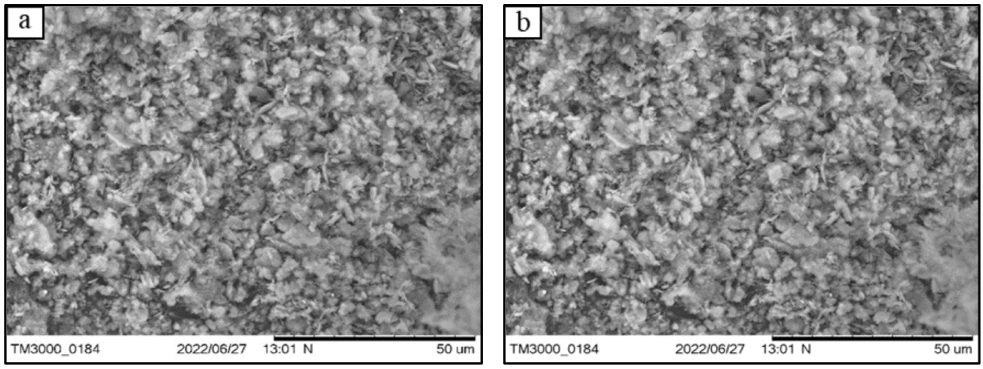


Figura 5 - Imagens ao MEV do metacaulim.

A partir da demarcação amarela, na Figura 6, é possível notar o aparecimento de cristais cúbicos no MEV das zeólitas sintetizadas, estes sendo característicos de zeólitas do tipo A conforme o trabalho de Santana, 2012.

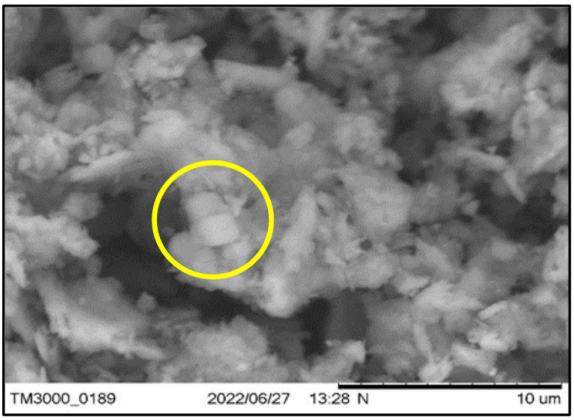


Figura 6 - Imagem ao MEV das zeólitas.

3.3 Adsorção de Umidade

A adsorção de umidade disposta no gráfico da Figura 7 dispõe da média da porcentagem de adsorção (duplicata) em função do tempo em horas. A partir do gráfico de adsorção de umidade, nota-se pequenas flutuações do início da adsorção até o tempo de 48 horas, e em sequência o gráfico adota um comportamento que se assemelha a uma reta crescente até a última pesagem no tempo de 216 horas, onde a taxa de adsorção, na média, alcança o seu maior valor com 10,06% de umidade adsorvida.

Até o tempo de 8 horas, a taxa de crescimento na adsorção de umidade apresentou um crescimento mais acelerado, quando comparado aos tempos posteriores, isso se deve, possivelmente, a saturação da zeólita, a qual adsorveu uma grande quantidade de

umidade, nas primeiras, em seus poros e consequentemente vai perdendo superfície de contato com a umidade, logo, o crescimento na taxa de adsorção vai desacelerando até se manter constante. Ademais, é possível notar um potencial de adsorção ainda maior para o material zeolítico formado no presente trabalho, visto que, o comportamento crescente do gráfico tende a continuar até a saturação máxima da zeólita, ou seja, a taxa média de adsorção mantendo-se constante.

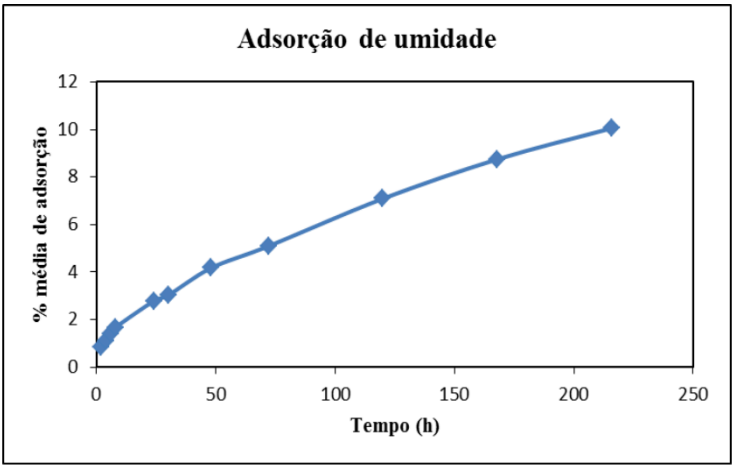


Figura 7 – Gráfico de adsorção de umidade.

4 I CONCLUSÃO

O caulim de enchimento, material de partida do presente trabalho, é constituído essencialmente pelo mineral caulinita, sendo acompanhado por impurezas, como o quartzo, em pequenas concentrações. A partir das análises morfológicas do MEV e mineralógicas do DRX, o caulim apresentou-se como matéria prima viável para a produção de zeólitas do tipo A, sendo possível a produção por via hidrotermal dividida nas etapas de calcinação e síntese dinâmica.

Em relação aos ensaios de adsorção, pode-se afirmar que o material zeolítico (Zeólita A) formado no presente trabalho foi eficiente na adsorção de umidade nos tempos adotados pela metodologia. Ressalta-se um potencial de adsorção ainda maior, visto que o comportamento crescente do gráfico tende a continuar crescendo até a saturação total da Zeólita e consequentemente se manter constante.

REFERÊNCIAS

A.N.S. BRAGA, V.N. SIMÕES, L.S. NEIVA, L.GAMA. **síntese de zeólitas pelo método hidrotérmico assistido por microondas: uma revisão da literatura**./ revista eletrônica de materiais e processos/ ISSN 1809-8797/ v.7.7(2012) 215-2020.

MÁRTIRES R. A. C., 2009. Sumário Mineral, Caulim. Série estatísticas e economia mineral, DNPM.
PINHEIRO, D. DO R.; GONÇALVES, L.R.; DE SENA, R.L.P.; MARTELLI, M.C.; NEVES, R. DE F.; RIBEIRO, N.F. da P. 2020. **Industrial kaolin waste as raw material in the synthesis of the SAPO-34 molecular sieve**. Materials Research 23: 1–6.

FARIAS, B.M.; RODRIGUES, E.C.; ROCHA, C.A.F. DA; PINHEIRO, A. DOS P.; MACÊDO, E.N.; SOUZA, J.A. DA S. 2020**. Produção de matrizes adsorventes a partir de zeólita A e sodalíta**. Brazilian Journal of Development 6: 73464–73478.

RODRIGUES, EMERSON CARDOSO. **Produção de material zeolítico a partir de caulim da Amazônia em escala semi piloto: aplicação na adsorção de cobre**. 2019. 92 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade de Federal do Pará, Belém, 2019.

SANTANA, D. L. et al**. Zeólita A sintetizada a partir de rejeitos do processo de beneficiamento de caulim**. Cerâmica, São Paulo, v. 58, n. 346, p. 238-243, abr./jun. 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ce/v58n346/v58n346a15.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2022. <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132012000200015>.

CAPÍTULO 10

ESTUDO DA ESTABILIDADE DO EXTRATO DE FOLHAS DE CRAJIRU (*ARRABIDAEA CHICA*) E APLICAÇÃO NO TINGIMENTO DE TECIDOS DE ALGODÃO CATIONIZADOS

Data de aceite: 03/07/2023

Julie Hangai
Universidade Estadual de Maringá

Alexandre Jose Sousa Ferreira
Universidade Federal de Santa Catarina

Nívea Taís Vila
Universidade Estadual de Maringá

Simone Fiori
Universidade Estadual de Maringá

Márcia Gomes da Silva
Universidade Estadual de Maringá

RESUMO: O presente estudo avaliou a influência da temperatura na extração do corante a partir das folhas de crajiru, a estabilidade do extrato à ação da luminosidade e a aplicação no tingimento da fibra de algodão após pré-tratamento de cationização com quitosana. A temperatura de extração que apresentou maior eficiência foi a de 90 °C, o extrato, por sua vez, não apresentou resistência à luz. O aumento da temperatura e a cationização favoreceram um maior esgotamento do corante no processo de tingimento.

PALAVRAS-CHAVE: Tingimento, corante natural, cationização, *Arrabidaea chica*.

INTRODUÇÃO

A demanda por produtos mais sustentáveis abre a possibilidade do uso de corantes naturais no tingimento de têxteis, visto que este processo é um dos mais impactantes dentro da cadeia de produção têxtil (NARIMATSU, 2020). O crajiru (*Arrabidaea chica*), uma planta trepadeira tipicamente encontrada na Amazônia, possui folhas que quando fervidas em água liberam uma cor vermelha devido à presença de antocianinas em sua composição química, tornando-a uma potencial fonte de corante natural para o tingimento dos materiais têxteis (SANTOS, 2015).

Há certa dificuldade no tingimento das fibras de algodão, uma vez que as mesmas se carregam negativamente em meio aquoso, e como grande parte dos corantes possui caráter aniônico, resulta-se na repulsão entre o corante e a fibra (ALI; HUSSAIN; NAWAZ, 2009). Uma alternativa a este problema é a cationização da fibra antes do tingimento, eliminando a repulsão

e a necessidade da adição de eletrólitos (BRIZIDO, 2018). O objetivo deste estudo foi avaliar a estabilidade do extrato de crajiru à presença de luz, desenvolver um pré-tratamento nos tecidos de algodão e avaliar o rendimento tintorial dos tecidos tingidos com e sem o pré-tratamento.

MATERIAIS E MÉTODOS

Avaliação da influência da temperatura no rendimento de extração do corante

Os extratos foram preparados em temperaturas de 40, 60, 80 e 90°C. Independente da temperatura utilizada, o extrato de crajiru foi preparado adicionando-se 10 g de folhas secas trituradas a 1 litro de água destilada. As soluções foram aquecidas em banho termostatizado até à temperatura de tratamento, mantendo-se nestas condições durante 60 min. Por fim, os extratos foram filtrados, diluídos e analisados em um espectrofotômetro Shimadzu 1601 DC.

Estudo da estabilidade do corante

O teste de estabilidade foi feito em amostra do extrato na proporção de 1% (p/v). Determinou-se a estabilidade em solução tampão acetato de sódio/ácido acético a pH 3,0. Preparou-se uma amostra de 50 mL do extrato e colocou-se em vidro transparente e vedado. O vidro foi mantido no laboratório à temperatura ambiente, sob iluminação de luz fluorescente. Por fim, realizou-se a avaliação da estabilidade do extrato por meio de um espectrofotômetro Shimadzu 1601 DC durante um período de 21 dias.

Pré-tratamento do algodão com quitosana

Preparou-se uma solução contendo 1,5% (p/v) de quitosana e 2% (v/v) de ácido acético. Agitou-se a solução à temperatura ambiente até completa dissolução da quitosana. As amostras de tecido 100% algodão foram impregnadas durante 10 minutos na solução de quitosana, sendo que na sequencia, as mesmas foram espremidas num foulard, aplicando-se um pick-up de 80%, secas à temperatura de 100°C por um período de 3 min e termofixadas a 160°C durante 3 min, numa rama. Por fim, as amostras foram enxaguadas em água à temperatura de 50°C e secas à temperatura ambiente.

Tingimento dos tecidos de algodão

As amostras sem pré-tratamento foram submetidas ao processo de tingimento com extrato de crajiru (10 gL^{-1}) nas temperaturas de 60, 70, 80 e 90°C, durante 60 min, utilizando uma relação de banho de 1:100. Os ensaios foram realizados na máquina de tingimento Kimak AT1-SW. Após, as amostras foram lavadas com 2 gL^{-1} de detergente não iônico a 60°C por 10 min, lavadas com água fria e secas à temperatura ambiente. Os efluentes foram analisados em um espectrofotômetro Shimadzu 1601 DC, calculando-se

o percentual de esgotamento do corante a partir da Equação 1.

$$E\% = \frac{\text{Abs } (\lambda \text{ max inicial}) - \text{Abs } (\lambda \text{ max final})}{\text{Abs } (\lambda \text{ max inicial})} \times 100 \qquad \text{Eq. 1}$$

Sendo que: Abs (λ max inicial) = absorção do comprimento de onda máximo inicial; Abs (λ max final) = absorção do comprimento de onda máximo final.

Por fim, seguindo os processos anteriormente citados, foi realizado o tingimento nas temperaturas de 50 e 90°C de amostras com pré-tratamento com quitosana, a fim de avaliar a influência da cationização no rendimento tintorial do processo de tingimento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O ensaio de varredura mostrou que o comprimento máximo de absorção do extrato de folhas de crajiru foi de 484 nm. Analisando os espectros UV-Vis (Figura 1) observa-se que o incremento da temperatura de extração conduziu a um aumento da absorvância do extrato, indicando uma maior concentração de compostos em solução e, consequentemente, uma maior eficiência do processo na temperatura de 90 °C.

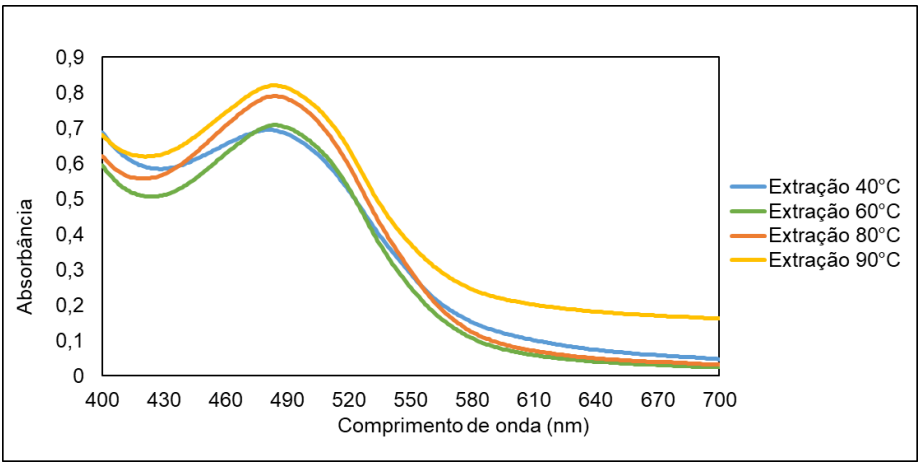


Figura 1 – Espectros de absorção UV-Vis dos extratos em diferentes temperaturas de extração.

A Figura 2 apresenta o comportamento do extrato de crajiru na presença de luminosidade em relação ao tempo de armazenamento.

Figura 2 – Degradação da cor do extrato de crajiru na presença de luminosidade.

É possível observar uma perda significativa de coloração nos primeiros 7 dias de exposição à luz. A partir desse período, os extratos mantiveram a estabilidade da cor. De acordo com Santos (2015), as antocianinas são suscetíveis à degradação, sendo sua estabilidade afetada por diversos fatores, como pH, temperatura, luz e oxigênio.

Os resultados do tingimento das amostras com e sem o pré-tratamento em diferentes temperaturas estão apresentados na Tabela 1. Observou-se através dos valores de esgotamento, que o aumento da temperatura favoreceu o rendimento tintorial, sendo o maior rendimento obtido na temperatura de 90 °C. Este comportamento pode ser atribuído à maior energia cinética das moléculas de corante a temperaturas mais elevadas e à maior capacidade de migração das mesmas nestas condições (ALI; HUSSAIN; NAWAZ, 2009). A coloração das amostras também variou com a temperatura, obtendo-se tonalidades próximas da cor rosa em temperaturas mais baixas (50 e 60 °C) e tonalidades marrons em temperaturas superiores. Os tingimentos nas temperaturas de 50 e 90 °C das amostras cationizadas mostraram que o pré-tratamento proporcionou um aumento no esgotamento do corante, com tonalidades marrons mais intensas. Isto se deve ao fato de o pré-tratamento produzir um potencial elétrico positivo na superfície do algodão, aumentando a afinidade entre a fibra e o corante (BRIZIDO, 2018).

Temperatura (°C)	Esgotamento sem quitosana (%)	Cor obtida	Esgotamento com quitosana (%)	Cor obtida
50	52,0		63,7	
60	58,3		*	*
70	65,2		*	*
80	69,6		*	*
90	74,9		81,6	

* temperatura de tingimento não testada em amostra com pré-tratamento com quitosana.

Tabela 1 – Resultados de cor e rendimento do processo de tingimento em diferentes temperaturas nas amostras com e sem pré-tratamento com quitosana.

CONCLUSÕES

O extrato de folhas de crajiru não apresentou resistência à luz, sofrendo maior degradação nos primeiros dias de exposição. O corante obtido pode ser utilizado como uma alternativa ao tingimento de tecidos de algodão, obtendo-se tonalidades marrom ou rosa dependendo da temperatura do tingimento, contudo, o esgotamento do corante é maior em temperaturas mais elevadas. A cationização dos tecidos promoveu maior rendimento tintorial do processo de tingimento.

AGRADECIMENTOS

À Fundação Araucária e à Universidade Estadual de Maringá pela bolsa PIBIC-AF-IS.

REFERÊNCIAS

ALI, S.; HUSSAIN, T.; NAWAZ, R. **Optimization of alkaline extraction of natural dye from Henna leaves and its dyeing on cotton by exhaust method**. Journal of Cleaner Production, 17(1), p.61–66, 2009.

BRIZIDO, V. Z. **Tingimentos de malhas de algodão cationizadas com 3-cloro-2-hidroxipropiltrimetilamônio (CHTAC)**. São Bernardo do Campo: Centro Universitário FEI, 2018.

NARIMATSU, B. M. G. et al. Corantes naturais como alternativa sustentável na indústria têxtil. Volta Redonda: **Revista Valore**, 2020.

SANTOS, R. P. **Extração, caracterização e avaliação bioativa do extrato de Arrabidaea chica**. 2015. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, [s. l.], 2015.

CAPÍTULO 11

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E NOVAS TECNOLOGIAS PARA A INDUSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Data de aceite: 03/07/2023

Everton Augusto Gonçalves
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul; Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia (FAENG), Mestrado Profissional em Eficiência Energética e Sustentabilidade

Andréa Teresa Riccio Barbosa
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul; Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia (FAENG), Mestrado Profissional em Eficiência Energética e Sustentabilidade

RESUMO: O alto consumo energético, o esgotamento dos recursos naturais e a alta taxa de resíduos gerados são problemas causados pela construção civil, evidenciando a necessidade de uma mudança no ato de construir, seja através da adoção de novas tecnologias construtivas ou intervenções no planejamento. Dessa forma, pode-se afirmar que o raciocínio imediatista na fase de planejamento e execução da obra podem resultar em construções pouco eficientes no quesito energético e de conforto térmico, se tornando o principal problema no que tange a eficiência energética. Este artigo apresenta uma discussão sobre o tema do combate ao desperdício energia elétrica e insumos, e aplicações de novas tecnologias ao longo de todo o processo construtivo das edificações. Verificou-se que os métodos construtivos utilizados no Brasil são os mesmos utilizados a décadas e o setor de construção civil é reconhecidamente conservador e tradicionalmente contrário a inovações e adoção de mudanças. Evidenciou-se, entretanto, que há necessidade de se adotar princípios sustentáveis e soluções tecnológicas que possam reduzir o consumo de energia. Um bom planejamento do canteiro de obras, adoção de indicadores de sustentabilidade e uma equipe consciente e engajada são as chaves para uma obra sustentável.

PALAVRAS-CHAVE: Eficiência energética, tecnologias inovadoras, construção civil.

ENERGY EFFICIENCY AND NEW TECHNOLOGIES FOR THE CIVIL CONSTRUCTION INDUSTRY

ABSTRACT: High energy consumption, or natural resources generated to use are the high civil construction problems, evidencing the need for a change in the construction act, either through the new construction technologies adoption or interventions

in planning. In this way, it can be said that the problem is not be efficient in the planning and execution phase of the work can result in bad energy efficiency. This article presents a discussion on the combating waste electricity issue and inputs, and new technologies applications throughout the buildings construction process. It was found that the methods used in Brazil are the same used in the decades and the civil construction sector is admittedly conservative and did not change the innovation and adoption of changes in Brazil. It was evidenced, however, there is a need to improve technologies and improve solutions that can reduce energy consumption. A good planning the construction site, adoption of sustainability indicators and a conscious and engaged team are the keys to a sustainable work.
KEYWORDS: Energy efficiency, innovative technologies, civil construction.

1 I INTRODUÇÃO

Em função do progressivo aumento da demanda por energia, a matriz energética mundial vem se baseando em combustíveis fósseis e no consumo de energia elétrica, degradando o meio ambiente pela poluição, modificação dos ecossistemas e emissões de gases de efeito estufa na atmosfera (MOURA e MOTTA, 2013).

Além do alto consumo energético, o esgotamento dos recursos naturais e a alta taxa de resíduos gerados são problemas causados pela construção civil, evidenciando a necessidade de uma mudança no ato de construir, seja através da adoção de novas tecnologias construtivas ou intervenções no planejamento.

Dessa forma, pode-se afirmar que o raciocínio imediatista na fase de planejamento e execução da obra podem resultar em construções pouco eficientes no quesito energético e de conforto térmico, se tornando o principal problema no que tange a eficiência energética. A decisão pela implantação de novas tecnologias é um processo por meio do qual um indivíduo conhece uma inovação, forma a opinião de rejeitar ou adotar uma nova ideia, e confirma esta decisão (TOLEDO *et al.*, 1999).

Cada país apresenta um comportamento de resposta diferente ao avanço tecnológico, sendo importante entender o modelo ao qual cada um está inserido. De acordo com Toledo *et al.* (1977), o Brasil se insere dentro do Sistema Nacional de Aprendizado (SNA) analisando o processo de inovação tecnológica de outros países, considerando o padrão nacional: do nível de educação ambiental da mão de obra, da capacidade técnica dos profissionais e empresas de aquisição de tecnologia e o comprometimento de recursos em aprendizagem.

De acordo com Betts *et al*. (2004, p.1) a palavra tecnologia é um termo que envolve o conhecimento técnico cientifico e as ferramentas, processos e materiais criados e/ou utilizados a partir de tal conhecimento. Ainda segundo os mesmos autores citados, as inovações tecnológicas no cenário da construção civil só começam a ocorrer a partir da década de 1980 impulsionado pelas exigências do mercado e das políticas ambientais, bem como pelo questionamento da indústria que percebe um atraso tecnológico com

relação as mudanças socioeconômicas que ocorrem no contexto global levando o setor a repensar seu processo de gestão e produção.

Com o atraso nas inovações tecnológicas o Brasil viveu o que ficou conhecido como “década perdida” sem grandes façanhas econômicas buscando uma constante reestruturação econômica e o fortalecimento da indústria nacional (JUNIOR, 2008).

Com isso, a indústria nacional se viu inserida em uma grande crise que levou a falências de várias empresas devido a baixas qualidades nas construções, posteriormente demolidas. Potti *et al.* (2017) ressaltam que para superar esse contexto, o setor da construção civil teve que se adequar primando pela racionalização do seu sistema de processos, investir em novos produtos e, principalmente na melhoria da qualidade dos produtos finais.

Souza (2015, p. 13) sugere que a inovação tecnológica está ligada ao desenvolvimento de novas funcionalidades e efetivos ganhos de qualidade e produtividade resultando em “maior competitividade”. Entretanto, para que isso ocorra de forma eficiente e eficaz é necessário, de acordo com Thomaz (2002) aliar as novas técnicas da construção com os conhecimentos tradicionais para que os projetos não apresentem insucessos, sempre capacitando os profissionais para atenderem as novas tendências do setor.

Por décadas o setor elétrico brasileiro foi marcado por forte influência governamental e pela aplicação de tarifas reduzidas, em consequência disso haviam poucos interesses em medidas de redução de consumo ou aumento da eficiência de alguns processos até alguns anos.

Com o passar do tempo o setor elétrico passou por uma reestruturação trazendo à tona a preocupação com a redução de consumo de energia, tanto por parte de órgãos públicos como por parte de iniciativas privadas.

Considerando a introdução acima, este artigo visa apresentar uma análise ampla sobre o consumo energético no setor da construção civil, com exposição de algumas técnicas construtivas inovadoras e sustentáveis que contribuam para a melhoria do desempenho do processo construtivo.

2 I DESENVOLVIMENTO

Soluções sustentáveis podem ser adotadas para minorar os impactos do uso da energia, concebendo a racionalidade consciente desse recurso. Na fase do projeto arquitetônico, citam-se: priorização da ventilação e iluminação naturais, reduzindo a dependência dos sistemas de iluminação e climatização e consequente consumo de energia; adoção de energias renováveis (solar, eólica, entre outras); opção por materiais com menores níveis de emissões e de fornecedores que apresentem menores níveis de emissões na produção de materiais; previsão de mecanismos de controle de consumo de energia; e previsão de plantio de árvores e reflorestamento para resgate de carbono (BRANCO, 2013) (MORISHITA, 2011).

Na fase de construção e gerenciamento da obra, são citados: implemento de técnicas de manejo do solo, que combinadas com o reflorestamento, podem controlar as emissões de CO_2; reaproveitamento de recursos e utilização de materiais renováveis; emprego de técnicas de reciclagem de resíduos por meio das quais é possível reduzir o consumo de energia, obtendo-se economia energética (tanto porque os resíduos frequentemente incorporam grandes quantidades de energia quanto porque reduzem-se as distâncias com transporte de matérias-primas); e uso de combustíveis com menores níveis de emissões nos equipamentos (BRANCO, 2013) (MORISHITA, 2011).

Já na fase de uso, recomenda-se, entre outros: substituição de sistemas elétricos ou a gás por energia solar; utilização de equipamentos de condicionamento de ar mais eficientes e que utilizam gases menos agressivos à camada de ozônio e com menor impacto no efeito estufa; implantação de sistemas de iluminação mais eficientes, com luminárias e lâmpadas de alto desempenho e eficiência energética; e utilização de produtos economizadores de energia (BRANCO, 2013) (MORISHITA, 2011).

A tecnologia e os materiais empregados nas construções brasileiras são os mesmos utilizados a décadas, com pouca racionalidade e grande geração de resíduos, o que pode ser justificado pela alta quantidade de construções informais, a baixa escolaridade e capacitação técnica da mão de obra. Em toda a cadeia produtiva, que envolve desde a extração da matéria prima até a decomposição (Figura 1), são observados altos níveis de consumo energético.

Figura 1. Ciclo de Vida das Edificações.

Fonte: modificado de TAVARES (2007).

Para melhor entendimento da real demanda de energia durante o ciclo de vida das edificações, tem-se o seguinte enquadramento:

• Energia incorporada: na fabricação dos materiais de construção, dos seus sistemas e componentes necessários para construir;

• Energia cinza: na distribuição e transporte dos materiais e sistemas;

• Energia induzida: na construção do edifício;

•Energia operativa: no funcionamento do edifício incluindo equipamentos e eletrodomésticos dos usuários.

Toda essa energia despendida nas diferentes etapas do ciclo de vida das edificações pode ser observada na Figura 2, onde é possível verificar que a maior parcela de energia gasta se encontra na fase operativa da edificação.

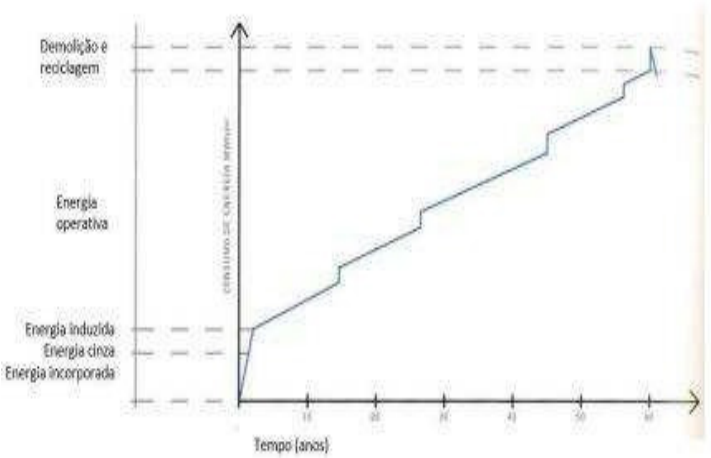


Figura 2. Energia no Ciclo de vida das edificações.

Fonte: MOURA E MOTTA (2013).

Em uma visão mais ampla, na Europa, cerca de 50% da energia consumida é utilizada na produção e manutenção de edifícios, enquanto que, no mundo corresponde a cerca de 32% da demanda global energética de acordo com IEA (do inglês, *International Energy Angency*) (2012).

No Brasil, em 2017, o consumo energético em edificações comerciais, residenciais e públicas foi responsável por 14,5% do consumo total de energia e cerca de 50,8% do consumo de eletricidade neste mesmo ano (BEN, 2019).

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) prevê um incremento de aproximadamente 57% do consumo de energia *per capta* entre os anos de 2014 até 2030. Para atender essa expectativa de demanda, será necessário um incremento na geração distribuída, na geração *on grid* e na auto geração, além da provável economia gerada com o aumento das ações nas áreas de eficiência energética, como mostra a Figura 3.

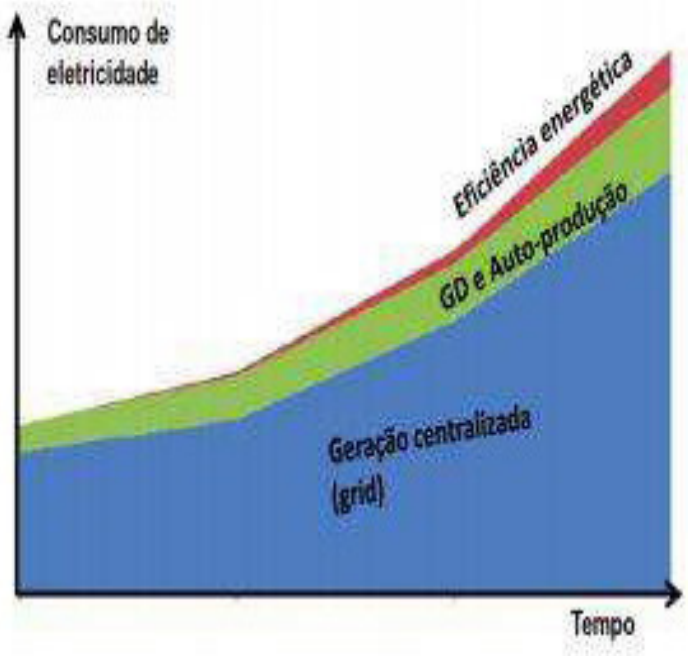


Figura 3. Demanda de eletricidade e fontes de atendimento à demanda de energia.

Fonte: BEN (2019).

A produção industrial, que inclui a construção civil, e o transporte de carga/passageiros respondem por aproximadamente cerca de 64% do consumo de energia de todo o país, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em seu último Balanço Energético Nacional (BEN) de 2019 (Figura 4).

Figura 4. Uso da energia no Brasil.

Fonte: BEN (2019).

Segundo Morishita (2011), o consumo de energia também sofre variação de acordo com a finalidade da edificação, seja ela, pública, comercial ou residencial. De acordo com Moura e Motta (2013), a fase de projeto pode ser determinante para a implementação de soluções que trarão melhorias significativas ao conforto térmico durante a utilização das edificações.

Outros aspectos importantes que auxiliam na eficiência energética são citados por Betts *et al.* (2019), como por exemplo: janelas e portas com aberturas maiores, telhados voltados para o norte geográfico, aberturas zenitais (claraboias), controle de irradiação solar por brises fixos, vegetação externa para redução da temperatura e telhados verdes com superfícies gramadas que retardam o aquecimento e resfriamento do telhado.

3 | CONFORTO TÉRMICO

O uso de técnicas para melhoramento do conforto térmico de ambientes construídos proporciona um ganho que diz respeito à eficiência energética, uma vez que é o maior responsável pelo elevado consumo de energia elétrica.

Além disso o desempenho energético está ligado às trocas de calor de uma edificação com o meio ambiente que variam de acordo com a temperatura ambiente, velocidade dos ventos, radiação solar e umidade relativa do local que se encontra inserida a construção. Portanto, faz-se necessário a adoção de medidas que proporcionem a racionalização no uso de energia, eliminando desperdícios. Então, pode-se afirmar que a preocupação com conforto térmico é dividida em dois princípios, o aquecimento e o resfriamento.

O aquecimento pode utilizar meios artificiais, como energia elétrica e queima de combustíveis fósseis nas instalações de caldeiras ou, naturais que consiste no aproveitamento do calor gerado pelo sol.

Dentre as estratégias para o uso de recursos naturais, tem-se: amplas aberturas com vidro, uso de vidros de múltiplas camadas, uso de cores escuras nas superfícies externas para maior absorção dos raios solares, uso de paredes do tipo trombe (paredes de acumulação), que consiste em criar uma convecção induzida pelo aquecimento do ar no espaço do vidro e a parede, jardins de inverso que distribuem a radiação solar para o interior dos ambientes, e a calefação por meio de água quente.

Quando a preocupação é voltada para a variação de temperatura em dias frios e quentes outras alternativas podem ser utilizadas, bem como: varandas fechadas com vidros, coberturas com inclinações acentuadas e voltadas para o norte, compartimentação de ambientes em dias frios, aberturas zenitais, aberturas que possibilitam a ventilação cruzada, janelas com bandeiras basculantes e telhados verdes.

Além das estratégias de projeto apresentadas, a construção civil dispõe de outros princípios da eficiência energética como, por exemplo, o aquecimento solar e a energia solar fotovoltaica.

4 | EFICIENCIA ENERGETICA NO CANTEIRO DE OBRAS E INDICADORES

Um dos maiores desafios em se tratando de Sustentabilidade no ambiente construído é trazer a eficiência energética para dentro do canteiro de obras. Isso porque, de acordo com uma pesquisa desenvolvida pela Universidade Federal de Santa Catarina, 44% de toda energia elétrica consumida no país é destinada ao setor da construção civil, seja nos setores residenciais, públicos ou comerciais.

Isso torna uma necessidade urgente de utilizações de métodos construtivos mais eficientes e ecologicamente corretos como, por exemplo, o uso de blocos ecológicos e reutilização de água.

Aliada a fase de planejamento, a aplicação de práticas de eficiência energética no canteiro de obras não visa somente a redução do custo pontual, mas a garantia de que a edificação utilizará a energia de forma inteligente, mesmo depois da entrega.

Essas medidas valorizam o imóvel e garantem a sustentabilidade na construção civil. A exemplo das ações tecnológicas, estas estariam relacionadas à substituição de sistemas e aos componentes com melhor eco eficiência; as ações econômicas envolveriam subsídios externos como redução de tarifas para usos de sistemas e componentes economizadores; e as ações sociais estariam focadas na conscientização e na educação ambiental do uso dos recursos.

Thomas e Costa (2017) argumentam que para melhorar a sustentabilidade dos canteiros de obras, o projeto de instalações provisórias deve ter as soluções adotadas nos edifícios sustentáveis, que a cadeia de suprimentos deve estar engajada exigindo o compromisso dos envolvidos, e que deve haver treinamento nas equipes com foco na sustentabilidade.

Sendo o canteiro de obras parte de um sistema complexo, de desenvolvimento social e de envolvimento empresarial (TIBAUT e ZAZULA, 2018), o conceito de desenvolvimento sustentável passou a desempenhar um papel importante na indústria da construção moderna (KALUARACHCHI, 2018).

Em virtude do aumento da necessidade de se implantar um Sistema de Gestão da Qualidade (SGQ), o Governo Federal instituiu o PBQP-h – Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat - baseado na norma NBR ISO 9001, especialmente para incentivar a Construção Civil (BRANCO, 2013).

Um dos projetos do PBQP-h é o SIAC - Sistema de Avaliação da Conformidade de Empresas de Serviços e Obras - que objetiva avaliar a conformidade do Sistema de Gestão da Qualidade das empresas no setor da construção civil no Brasil, contribuindo para intensificar a qualidade, produtividade e sustentabilidade no setor (SIAC, 2018). O programa prevê o uso de indicadores de eficiência energética e a redução da geração de resíduos.

5 | O USO DO BIOGÁS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

O biogás é um gás combustível constituído em média por 60% de metano e 40% de CO_2, obtido pela degradação biológica anaeróbica dos resíduos orgânicos ou mais conhecido como a decomposição da matéria orgânica de micro-organismos de animais. E a produção de Biogás ocorre através da digestão anaeróbia de matéria orgânica, e esta digestão ocorre em quatro etapas básicas: Hidrólise, Fermentação, Oxidação Anaeróbica e Formação de Metano e subprodutos (Biogás).

Com a vinda do conceito de sustentabilidade, a baixa racionalidade construtiva precisou ser revista, o que de fato implicaria em novos conceitos, tanto na utilização de matérias que como no descarte correto dos insumos.

A reciclagem dos RCDs (Resíduos de Construção e Demolição), aumenta a problemática do que fazer com os resíduos orgânicos gerados naturalmente pela construção e demolição.

A alternativa mais viável, com a finalidade de promover uma construção o mais sustentável possível, seria transformar a matéria orgânica industrial em energia, produzindo o chamado biogás.

Este é um subproduto da bio digestão, atingindo de 4 a 7% do peso da matéria orgânica inicial utilizada no processo, resultando da digestão anaeróbica, da fermentação na ausência de oxigênio, de material orgânico presente em dejetos animais, resíduos vegetais, lixos orgânicos residenciais, efluentes ou lixos industriais, entre outros. Materiais esses que, sob as condições adequadas de temperatura, agitação, massa, alcalinidade e pH composto produzem mistura de gases (contendo gás metano, dióxido de carbono, nitrogênio, gás sulfídrico e hidrogênio) capaz de gerar energia (COELHO *et al.*, 2006).

O biogás produzido por meio dos biodigestores pode ser utilizado como fonte de energia primária, especialmente para o acionamento de turbinas e motores, os quais acoplados à geradores elétricos, produzem energia.

Essa energia elétrica pode ser utilizada localmente, no canteiro de obras ou na indústria local e, havendo excedentes, pode ser vendida para concessionarias de energia elétrica local (COELHO *et al.*, 2006). Não obstante, o biogás também pode ser utilizado como combustível para veículos, os quais, em se tratando de construção civil, são utilizados para deslocamento de materiais (COELHO *et al.*, 2006).

A utilização do biogás proveniente de materiais da própria construção reverte em benefícios ao meio ambiente, minorando os impactos ambientais causados pela construção civil. Além de baratear o uso da energia no setor da construção civil, isso sem contar que, o uso do biogás favorece a diminuição de emissão de agentes causadores do efeito estufa, contribuindo, portanto, com o desenvolvimento sustentável.

6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

A construção civil é um setor de grande contribuição para a economia brasileira, a mesma proporcionou um aquecimento significativo no mercado de trabalho e a ascensão de projetos inovadores que passaram a pautar-se no conceito de sustentabilidade. É um setor reconhecidamente conservador e tradicionalmente contrário a inovações e adoção de mudanças.

Entretanto, também é evidente a necessidade do momento de se adotar princípios sustentáveis e soluções tecnológicas que possam reduzir o consumo de energia. Algumas medidas podem ser adotadas como fontes alternativas de energia, e ainda, adaptações técnicas de projeto podem ser realizadas para que haja melhor desempenho das edificações e o consumo passe a ser mais eficiente. Um bom planejamento do canteiro de obras, adoção de indicadores de sustentabilidade e uma equipe consciente e engajada são as chaves para uma obra sustentável.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

BEN - Balanço Energético Nacional, 2019, Departamento Nacional de Política Energética, Ministério das Minas e Energia, Governo Federal, Brasília, Brasil.

BETTS, André et al.; As Tecnologias e as Novas Formas de Subjetivação. 2004. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/e- psico/subjetivacao/tecnologia/tecnologias texto.html>. Acesso 12 de mar 2019.

BRANCO, M. T. C. As adaptações de uma construtora decorrentes da nova revisão do Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade do habitat: PBQP-H. 2013. 33p., 2013. TCC (trabalho de conclusão de curso). Administração de Empresas do UniCEUB – Centro Universitário de Brasília, Brasília.

COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; SILVA, O. C.; ABREU, F. C. A conversão da fonte renovável biogás em energia. V Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, 31 de maio a 2 de julho de 2006, Brasília-DF. IEA - International Energy Agency. Energy efficiency: The global exchange for energy efficiency policies, data and analysis. Acesso em: 02 out.2018.

JUNIOR, Ivan Franklin. Inovação tecnológica e modernização na indústria da construção civil. Ciência ET Praxis, v. 1, n. 02, p. 11-16, 2008.

KALUARACHCHI, R. K. D. G. *Analysis of Construction Waste Generation and Its Effect in a Construction Site*. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Architectural and Environmental Engineering, v.12, n., 2018, p. 508-511.

MORISHITA, C. Impacto do regulamento para eficiência energética em edificações no consumo de energia elétrica do setor residencial brasileiro. 2011. 232p. Dissertação de (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2011.

MOURA, A.; MOTTA, A. L. T. S. O Fator Energia na Construção Civil. In: *IX CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO*, 2013.

OLIVEIRA, L. H.; GONÇALVES, O. M. Metodologia Para a Implantação de Programa de Uso Racional de Água em Edifícios. São Paulo, 1999. Boletim Técnico PCC/247.

POTT, Luana Mariana; EICH, Monique Costa; ROJAS, Fernando Cuenca. Inovações tecnológicas na construção civil. XXII Seminário interinstitucional de ensino, pesquisa e extensão. Universidade de Cruz Alta – UNICRUZ. 2017.

SIAC – Sistema de Avaliação da Conformidade de Empresas de Serviços e Obras da Construção Civil, SiAC, Regimento Geral. 14, jun 2018. Acesso em: 05 set.2018

SOUSA, R. F., Inovações Tecnológicas na Construção Civil. 64 f. il. 2015. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.

TAVARES, D. A. C. Gestão Pública de Resíduos Sólidos da Construção Civil em Aracajú: um desafio ambiental. Sergipe, 2007. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Núcleo de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal de Sergipe, Sergipe, 2007.

THOMAS, N. I. R.; COSTA, D. B. Adoption of environmental practices on construction sites. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 17, n. 4, 2017, p. 9-24.

THOMAZ, E. Tecnologia, Gerenciamento E Qualidade Na Construção. São Paulo: Editora PINI, 1ª Edição, 2ª Tiragem. 2002.

TIBAUT, A.; ZAZULA, D. *Sustainable management of construction site big visual data*. Sustainability Science, v. 13, 2018, P. 1311–1322.

TOLEDO, RAQUEL, et al. A difusão de inovações tecnológicas na indústria da construção civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Trindade, Florianópolis, 1999.

CAPÍTULO 12

ENERGIA SOLAR: GERAÇÃO DISTRIBUIDA FOTOVOLTAICA - SUA IMPORTANCIA PARA O BRASIL

Data de submissão: 18/05/2023 *Data de aceite: 03/07/2023*

Milton Luis Filipe Muhongo
UNILAB - Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro Brasileira, Instituto de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, Curso de Engenharia de Energias Redenção – Ceará
http://lattes.cnpq.br/4496924048026451

Joel João dos Santos Mazumbua
UNILAB - Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro Brasileira, Instituto de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, Curso de Engenharia de Energias Redenção – Ceará
http://lattes.cnpq.br/0410824702126799

RESUMO: Este artigo aborda uma revisão simplificada referentes a geração de eletricidade por usinas hidrelétricas e suas principais preocupações, aborda também as questões mais relevantes e inerentes a geração distribuída (GD) e os seus impactos no funcionamento da rede elétrica. Discuti situações sociais afeta a geração distribuída e sua contribuição para a democratização do acesso a eletricidade e os respectivos serviços em países como Brasil e com geografia similar, tipos de tecnologias de GD, possíveis vantagens e desvantagens, e algumas considerações a si ter são a posterior apresentadas no artigo.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Solar Fotovoltaica, Geração Distribuída, Rede Elétrica, Otimização.

SOLAR ENERGY: PHOTOVOLTAIC DISTRIBUTED GENERATION - ITS IMPORTANCE FOR BRAZIL

ABSTRACT: This article covers a simplified review regarding the generation of electricity by hydroelectric power plants and their main concerns, also addresses the most relevant and inherent issues of distributed generation (DG) and its impacts on the operation of the electricity grid. I discuss social situations affecting distributed generation and its contribution to the democratization of access to electricity and the respective services in countries like Brazil and with similar geography, types of DG technologies, possible advantages and disadvantages, and some considerations to be taken are later presented in the article.

KEYWORDS: Photovoltaic Solar Energy, Distributed Generation, Power Grid, Optimization.

1 | INTRODUÇÃO

Há algum tempo, várias nações do mundo vêm impulsionando o uso de energia através de fontes alternativas que não dependem dos combustíveis fósseis e que sejam de origem limpa.

A matriz elétrica brasileira apresenta-se como um modelo essencialmente hidrotérmico de alto potencial, com forte influência e predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários, composto pelas entidades de várias regiões do país como Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região do Norte (INPE, 2017).

Uma das desvantagens das fontes hidrelétricas, fora a questão dos impactos socioambientais resultado das grandes inundações, é a dependência de um regime de chuvas conforme foi constatado pelo apagão de 2001 (crise resultado de uma falha no planejamento elétrico brasileiro) (GAZOLI, 2011).

Embora esta permite uma alta expansão do potencial de geração a partir de duas formas: modernização e ampliação das usinas já existentes, instalação de geradores em represas onde não há geração, fora estes fatores a energia fornecida pelas hidrelétricas provém de um sistema intermitente que está sujeito ao regime de chuva da localidade em que se situa a usina, tornando-a uma fonte sem controlabilidade pelo homem (GAZOLI, 2011).

Fora que, acoplado a estas questões tem a demanda crescente por eletricidade que ao longo dos anos só vem crescendo resultado da globalização deste recurso. E também devido às caraterísticas de suscetibilidade do recurso hídrico, acoplado a demanda por eletricidade, torna-se crucial o interesse por diversificar as fontes de energia que compõem a matriz elétrica brasileira, com foco nos recursos que transferem reduzidos impactos ao meio ambiente (VOVOS, *et al.*, 2005; INPE, 2017).

Sendo assim a opção pelo uso de outras fontes de geração de energias elétrica renováveis como a energia eólica e solar fotovoltaica, neste cenário surgem como alternativa para ajudar a aumentar a capacidade de geração de energia no Brasil e em outras geográficas com características similares.

A utilização do recurso energético solar consiste na conversão da radiação emitida pelo sol em energia térmica ou diretamente em energia elétrica, este último é amplamente conhecido com processo fotovoltaico. Mundialmente o uso desta tecnologia de conversão vem crescendo em níveis elevados, e potencializa a geração distribuída (GD), discutido e detalhado mais para frente (INPE, 2017).

O aproveitamento da energia do sol dá-se por diversas formas: concentradores solares, iluminação natural, energia solar fotovoltaica e outras. A energia solar fotovoltaica citado no parágrafo anterior consiste na captação da radiação emitida pelo sol, através de painéis solares, cuja função básica é convertem essa radiação em eletricidade.

No que diz respeito à capacidade mundial de produção de energia elétrica através de sistemas fotovoltaico, nos períodos de 2010 a 2020, este cresceu cerca de 17,6 vezes, ou seja, saindo de 40,1 GW para 707,5 GW, como se poder verificar na Figura 1.1. Já no período de 2011 a 2021, este saiu de 72,2 GW para 843,1 GW, observando-se um expressivo crescimento ao longo dos anos, sendo a Ásia-Pacífica a região de maior expressão com 501,6 GW, e posterior a Europa com 191,1 GW, a América do Norte com 104,4 GW, a américa do Sul e Central 22,8 GW, a África com 10,3 GW, Oriente Médio 8,0 GW (BP, 2021; BP, 2022).

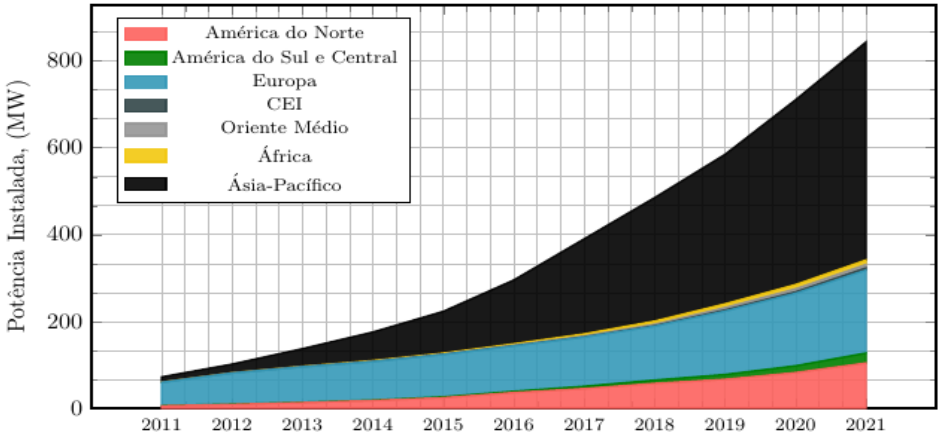


Figura 1.1- Crescimento Mundial da produção de energia elétrica através de sistemas solar fotovoltaica entres os períodos de 2011 a 2021.

Fonte: Adaptado de (BP, 2022).

Sendo que as expectativas são para uma maior expansão e crescimento, impulsionado pela redução de custos dos painéis fotovoltaico e dos incentivos governamentais (SANTOS, 2020).

De acordo com Coelho (2008), a ampliação da tecnologia fotovoltaica, que aumenta exponencialmente desde a década de 70, pode se dar em razão de três aspectos distintos como:

- Melhora significativa dos materiais empregados na fabricação de células fotovoltaica. Que vem permitindo o aperfeiçoamento, não só em termos de eficiência de conversão, mas também em flexibilidade, peso e custos.
- Busca incessante por fontes renováveis de energia que se adéquem às legislações vigentes, principalmente, nos tempos atuais, em que o apelo ecológico e as dificuldades na obtenção de licenças dos órgãos ambientais para construção de usinas de grande porte se fazem presente.
- Evolução da eletrônica de potência, que é aplicada como ferramenta de processamento da energia fotogerada. Esta tem o objetivo de processar os níveis de tensão e corrente de entrada e ajusta-os para alimentar uma carga específica.

O Brasil é um país geograficamente bem posicionado, e com disponibilidade de recurso solar na faixa de 1.550 a 2.350 kWh/m^2 por ano, com índices altos de radiação predominantes na região nordeste do país, segundo o atlas brasileiro de energia solar, diariamente incide uma irradiação global horizontal média entre 4.444 Wh/m^2 (Sul) a 5.483 Wh/m^2 (Nordeste) no país, mostrando que o país possui um alto potencial para geração de energia elétrica por intermédio de fonte solar (INPE, 2017).

Até fevereiro de 2011, o número de sistemas fotovoltaicos integrado com a rede elétrica em operação no Brasil apenas atingiu o valor de 51 unidades, dos quais, o maior número estava associado a projetos de P&D, com potência elétrica máxima instalada de 350kWp (GAZOLE, 2011).

Segundo a Aneel (2019), em 2019 o Brasil ultrapassou a marca de 1GW de potência instalada no que diz respeito aos sistemas de micro e minigeração distribuída de eletricidade, sendo o resultado alcançado bastante motivado pela sua resolução normativa (REN) 482/2012, de 17 de abril de 2012, atualizada pela revisão REN 687/2015, de 24 de novembro de 2015, que garantiu as bases legais para que consumidores pudessem gerar sua própria energia e disponibilizar à rede sobre regime específico, discutido no subcapítulo 3 deste trabalho sobre geração distribuída.

Segundo os dados da Aneel (2022), a geração distribuída (GD) introduziu cerca de 6,6 GW de potência no Brasil, considerando os meses de janeiro e dezembro de 2022, sendo 3,5 GW em 2021. O que demostra uma aceleração exponencial no que diz respeito ao incremento deste tipo de sistemas não centralizado. Já considerando até o mês de março de 2023, de acordo com os dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), o Brasil alcançou o número de 18 GW em geração distribuída (GD) de potência instalada, alavancados por instalações residências.

Sendo assim à tecnologia de geração distribuída agrega benefícios, não só de diversificação da matriz energética, como também auxilia o Brasil a buscar atingir metas ambientais pré-estabelecidas no ProGD (Programa de desenvolvimento da geração distribuída), de redução de emissões de CO_2 na atmosfera terrestre, em 43% até 2030, isso em relação aos dados de 2005. E também de atingir 10% de eficiência energética no sistema elétrico.

2 | JUSTIFICATIVA

A principal justificativa para a elaboração deste trabalho consiste em auxiliar na promoção dos estudos e compreensão inerente a geração de energia solar fotovoltaico não centralizado, compreender à geração distribuída (GD) e sua importância para a matriz elétrica Brasileira, bem como para questões sociais e ambientas. Os benéficos e os desafios inerentes a esse no Brasil e em outras geografias similar.

3 | RESULTADOS E DISCUÇÕES

3.1 Geração Distribuída

A geração distribuída ou geração dispersa (GD), é um modelo de geração independente de energia perto da carga, conectado à rede elétrica ou não, que se difere do modelo convencional de geração centralizada, bastante usado no passado (que hoje compartilha com outro modelo), e que está associado a elevadas perdas de energia devido a necessidade de a energia produzida em um dado local ser transferida para outro local, distante onde se realiza o consumo desta (RAU e WAN, 1994; GEOGILAKIS e HATZIARGYRIOU, 2013; ANEEL, 2017).

Foras as vantagens ambientais, trazida pela GD, ela também contribui na implementação de políticas energéticas competitivas, na diversificação dos recursos energéticos, redução do custo operacional na ponta, adiamento de atualizações de rede, menores perdas e menores custos de transmissão e distribuição, etc. (GEOGILAKIS e HATZIARGYRIOU, 2013).

Porém, a instalação inadequada de GD pode impacta negativamente a operação da rede de distribuição, gerando uma série de problemas técnicos, isso porque inicialmente as redes não forma construídas para receber injeção de energia de GD. Esta conexão inadequada pode elevar as perdas do sistema e os custos operacionais e de capital da rede (CHIRADEJA e RAMAKUMAR, 2003; HARRISON e WALLACE, 2003; GEOGILAKIS e HATZIARGYRIOU, 2013).

Por outro lado, já uma instalação ótima de GD pode melhorar o desempenho da rede em termos de perfil de tensão, reduzir os fluxos e as perdas do sistema e melhorar a qualidade da energia e a confiabilidade do fornecimento (KIM et al., 1988; WILLIS, 2000, KHATOD; PANT e SHARMA, 2013).

As GDs incluem sistemas de geração de energia elétrica e unidades de cogeração com potências nominas que alternam em kW a dezenas de MW (DICORATO e TROVATO, 2008).

Os sistemas de geração distribuída fundamentado em módulos fotovoltaicos são muito apropriados para aplicação em regiões com incidência da luz solar, onde os módulos fotovoltaicos têm como função converter a energia proveniente da luz solar, em energia elétrica tornando assim um mecanismo direto de conversão da energia proveniente da radiação solar (OLIVEIRA, et al., 2011).

No Brasil, em 2003 a implantação do programa luz para todos através do ministério das minas e energias permitiu a implantação de um número significativo de sistemas fotovoltaicos que garantiu que comunidades pudessem consumir uma pequena quantidade de potência elétrica diária, suficiente para agregar um conforto mínimo, outra hora inexistente para aquelas populações (GAZOLI, 2011).

3.2 Legislação

No Brasil, a definição de geração distribuída (GD) surgiu com o artigo 14 do decreto lei n° 5.163, de 30 de julho de 2004 que define:

> Para os fins deste Decreto, considera-se geração distribuída a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados, incluindo aqueles tratados pelo art. 8o da Lei no 9.074, de 1995, conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador, exceto aquela proveniente de empreendimento.

A resolução normativa da ANEEL nº 482 de 17 de abril de 2012:

> "Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências." (ANEEL, 2012).

Logo com a inserção e vigência da resolução normativa supracitada, deu-se a possibilidade para que os consumidores pudessem gerar a sua própria energia elétrica através de fontes renováveis e cogeração, e o excedente ser disponibilizado à rede elétrica da distribuição local (MUHONGO, 2021).

Este documento no seu Capítulo I, Art.1, relata as condições gerais de acesso à microgeração e minigeração distribuída, dentro daquilo que são os sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia (MUHONGO, 2021).

Segundo a Aneel (2017), a geração distribuída é o mecanismo de geração de energia elétrica que se diferencia do modelo de geração centralizada ou de usina de geração convencional, conforme exemplificado na Figura 1.2, este é instalado mais próximo da carga ou das unidades consumidoras, com a integração com a rede elétrica na forma de crédito, ou não integrado com à rede.

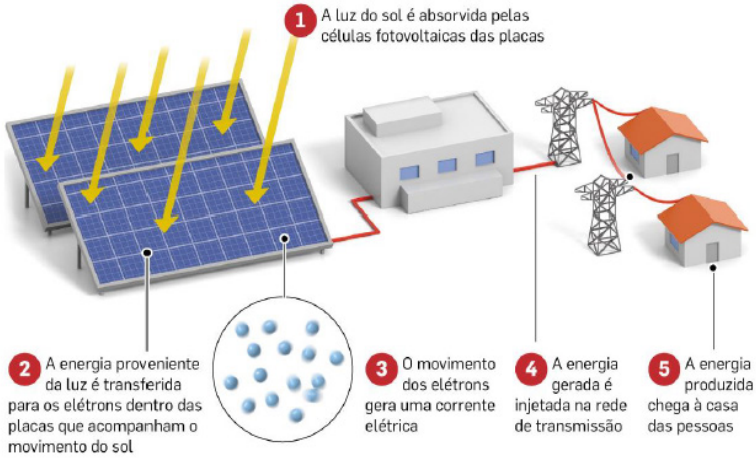


Figura 1.2- Diagrama de um Sistema Fotovoltaico de Geração Centralizada.

Fonte: Bastos (2017).

Na Figura 1.3 é possível observar a geração centralizada hoje, e a geração distribuída a que se pretende alcançar no futuro. Ou seja, no futuro será possível ocorrer o compartilhamento adequado e controlado entre geradores e consumidores.

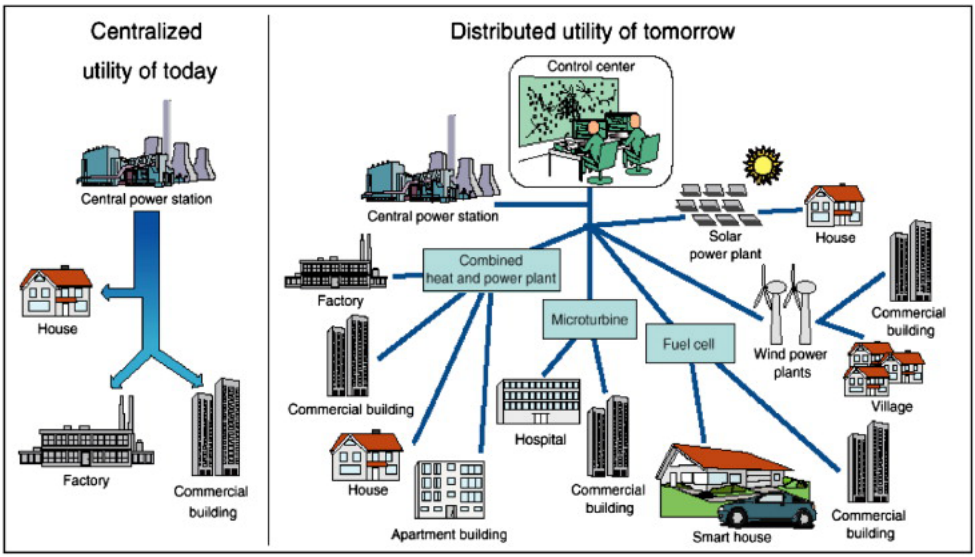


Figura 1.3 - Geração central de hoje, versos a geração distribuída que se pretende alcançar no futuro próximo.

Fonte: Adaptado de VIRAL e KHATOD (2012).

3.3 Vantagens e desvantagens

Na geração distribuída o uso de sistemas fotovoltaicos oferece inúmeros ganhos como redução das perdas e dos custos para transmissão de energia elétrica, proporciona uma atenuação ou alívio das redes de transmissão e distribuição (GAZOLI, *et al.*, 2013).

Contudo pode-se observar alguns benefícios que a geração descentralizada pode trazer, e alguns destes benefícios da geração distribuída para o Brasil são:

- Diversificação da matriz energética;
- Evita a existência de perda por transmissão e distribuição de energia;
- Equilíbrio de carga no sistema na rede de distribuição na fronteira com a rede básica;
- Matriz sustentável e atenuação dos impactos ambientais;
- Melhor aproveitamento dos recursos energéticos;
- Maior eficiência energética nos empreendimentos;

Os benefícios relacionados ao emprego de GD, podem ser divididos em três: benefícios ambientais, econômicos e técnicos (VIRAL e KHATHOD, 2012).

3.4 Geração distribuída X Geração centralizada

No cenário atual, a maior parte da energia elétrica produzida nos países com altos índices de desenvolvimento, ainda provem de grandes unidades geradoras de energia centralizadas. Contrariamente, a GD são tecnologias geração de energia eletricidade em proporções menores, através de diversos recursos energéticos, usado para oferecer alternativa ou aprimoramento aos sistemas de energia convencional (ACKERMANN; ANDERSSON; SODER, 2000; PEPERMANS *et al.,* 2005; RAJKUMAR e KHATOD, 2012; GEOGILAKIS e HATZIARGYRIOU, 2013).

Sendo que, as principais fontes destes recursos usados na geração centralizada (primeiro caso) se baseiam na queima de combustíveis fósseis (carvão, petróleo, gás natural, etc.), sistemas energia nuclear e em energia hídrica através de centrais hidrelétricas. Já os principais recursos de energia utilizados na GD advêm de uma vasta gama de tecnologias, dos quais tem se dado maior ênfase nas fontes renováveis.

De entre as diferentes origens, a energia eólica, energia hídrica, energia solar, energia geotérmica, energia das ondas e marés, biomassa (combustão direta, combustíveis gasosos – biogás, álcool combustível – etanol, etc.), constituem as principais fontes de produção de energia (DICORATO e TROVATO, 2008).

Face a enorme necessidade de energia elétrica, a maior parte da produção de eletricidade processa-se em grandes unidades centralizadas visto se apresentarem mais favoráveis do ponto de vista de economia de escala e da transmissão de eletricidade por longas distâncias. Apesar dos benefícios deste modelo de grandes usinas centralizadas ser atrativo, a conscientização das comunidades globais sobre este sistema de geração, a respeito destas acarretarem também impactos negativas bastantes consideráveis ao meio ambiente vem crescendo, sendo que estas também, não conseguem proporcionar certos benefícios como os quais se pode alcançar com a implementação da geração distribuída (BAZMI e ZAHEDI, 2011; RAJKUMAR e KHATOD, 2012; KHATOD; PANT; SHARMA, 2013).

Logo justifica-se o interesse crescente por tecnologias de geração distribuída baseadas em recursos energéticos renováveis e cogeração (DICORATO; TROVATO, 2008).

3.5 Considerações e limitações da geração distribuída (GD)

Apesar de os sistemas de geração distribuída alocarem vários benefícios ao sistema de potência, ou seja, à rede elétrica é importante atentar-se para algumas questões intrínsecas à sua utilização. Questões estas que tem a ver com nível de penetração dos sistemas de GD, controlo, tipo de tecnologia empregada, a configuração da rede de distribuição, proteção e capacidade da rede, e fluxo de potência bidirecional (DICORATO; TROVATO, 2008; ATWA, Y.M.; *et al.*, 2010; RAJKUMAR e KHATOD, 2012; KIRTHIGA; DANIEL; GURUNATHAN, 2013).

Um dos desafios atuais lançados para a comunidade cientifica e demais profissionais atuantes do sector consiste na incorporação de sistemas de geração distribuída em ampla escala. Sendo assim, algumas das limitações encontradas apresentam-se descritas em seguida:

- Fluxo de potência inverso: a rede elétrica convencionalmente não foi projetada para operar com um fluxo de potência bidirecional. Assim, a conexão de GD à rede elétrica pode provocar o mau funcionamento dos circuitos de proteção, uma vez que não estão preparados para esta situação. Atualmente grandes esforços têm sido feitos na projeção de novos sistemas de proteção de rede, sendo ainda uma área com grande margem de progressão.
- Potência reativa: a maioria das instalações de GD usam motores assíncronos na geração de energia, não produzindo desta forma energia reativa para a rede. A produção deste tipo de energia só é possível através do controlo da excitação de geradores síncronos, que são geradores que têm ganho grande importância nas unidades de pequena geração.
- Frequência do sistema: os desequilíbrios entre a energia que é requerida e a que é produzida têm como efeito desvios na frequência nominal da rede. Embora a implementação de pequenas unidades de geração auxiliem a evitar estes desequilíbrios, um mais exigente e complexo controlo dos sistemas também é necessário. Face à enorme dificuldade das operações de controlo, inúmeros estudos têm sido feitos na tentativa de melhorar os atuais sistemas.

Por um lado, é de ênfase positivo aos efeitos bons da geração distribuída para os problemas de qualidade de energia. Como por exemplo, em regiões dos quais o suporte à tensão é deficitário, e a geração distribuída pode destacar um papel importante, na medida em que a conexão de geração distribuído geralmente leva a um aumento da tensão na rede. Além de servir de suporte na melhoria da tensão fornecida, também auxilia na correção do fator de potência. Por outro lado, a errada utilização de unidades de geração pode levar a situações como o excesso de tensão e a flutuações de tensão na rede elétrica (MATOS; CATALÂO, 2013).

3.6 Impasses da Geração distribuída (GD)

Como referido no tópico anterior, os sistemas de distribuição foram no passado dimensionados para um fluxo de energia elétrica unidirecional e não bidirecional, desde o sistema de energia até a carga. O aparecimento de flutuações ou de um fluxo de potência inverso na rede elétrica, resultado da inserção de sistemas de geração distribuída, pode influenciar o sistema de distribuição no que diz respeito a perdas de energia, perfil de tensão, fiabilidade, qualidade de energia ou proteção e segurança do sistema. (LOPES, J.A.P. *et al.*, 2007, BAZMI; ZAHEDI, 2011).

Estas flutuações de tensão podem ser sobretensões ou sobtensões, que podem interferir na tensão do ponto de consumo. Estas situações podem ser causadas por

sistemas de geração de energia que dependem de condições naturais, como é o caso da energia eólica ou geradores solares fotovoltaicos, que são fontes intermitentes de energia. Perante isto, as unidades de geração com base nestes recursos não funcionam isoladamente, tendo como apoio outras fontes de energia (ER, 2003; MATOS; CATALÂO, 2013; EBAD; GRADY, 2016).

Outra questão que vale ressaltar é a qualidade da energia, dependo da circunstancia o sistema GD pode aumentar ou diminuir a qualidade tensão absorvida por outros usuários da rede de distribuição. A qualidade da energia que se refere ao grau com que as características elétricas se alinham com uma tensão perfeitamente sinusoidal e a forma de onda de corrente, com a corrente e tensão em equilíbrio (LOPES, et al., 2007; MATOS; CATALÂO, 2013).

Uma situação notável a se destacar é que um único sistema de GD grande, como por exemplo, uma turbina eólica, introduzido em uma rede fraca pode levar a problemas de qualidade de energia, particularmente durante a partida e a parada (LOPES, et al., 2007).

Para proteger o sistema das distorções na qualidade de energia, é interessante e relevante um controlo eficiente e pensado por parte dos operadores de rede, de forma a garantir uma acessibilidade constante à energia (MATOS; CATALÂO, 2013).

Outros impasses tem a ver com aspectos regulatório e normas que possam se adequar as necessidades do sector, bem como para os consumidores.

4 I CONCLUSÃO

Apesar das implicações e dos desafios técnicos, a geração distribuída pode ajuda a promover a democratização do acesso a eletricidade e os serviços inerentes a ele, para todos cidadãos do país. Ajudar a atenuar os custos com manutenção, levados a cabo em grandes sistemas de geração transmissão e distribuição de energia elétrica. Outro ponto tem a ver com a ausências de um regime de chuva em determinados locais, e que são capazes de causar a redução significativa dos níveis dos reservatórios das hidrelétricas, a ponto de conduzir a ativação de sistemas termoelétricos, que resultam é uma energia mais cara. Sendo assim a GD ajudam o Brasil a oferecer uma alternativa socialmente mais aceitável para garantir o acesso a eletricidade limpa e sustentável, evitando a construção de novos sistemas transmissão (onde GD pode dar uma resposta efetiva) e de grandes usinas geradoras.

Diversificação das fontes de energia para aumentar a segurança energética do país, isso porque em tempos modernos a energia representa desenvolvimento, e sua interrupção no fornecimento pode resultar em terríveis consequências, econômicas, socias e políticos.

Colabora com interesse da comunidade global por tecnologias e processos de geração de energia elétrica, mais sustentáveis e ambientalmente mais aceitáveis. E o Brasil sendo um país com uma ampla disponibilidade de recursos energéticos renováveis a

se explorar, investir mais em sistemas desta natureza resultaria em inúmeros ganhos não só técnicos e financeiros, bem como ambientas e socias.

As GDs permitem uma minimização das perdas do sistema elétrico, melhoria do perfil de tensão e na fiabilidade do sistema de distribuição, ajudam a dar visibilidade e importância nos estudos referentes a sistemas de energia renováveis dentro do contexto elétrico.

REFERÊNCIAS

ACKERMANN, T; ANDERSON, G.; SODER, L. "Distributed generation: a definition", **Electric Power System Research**, 57, pp. 195-204, 2001.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Brasil ultrapassa marca de 1GW em geração distribuída**. Brasil, 2019. Disponível em: https://bit.ly/3iRkzwQ. Acesso em: 10/05/2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, Microgeração e da Minigeração Distribuídas de Energia Elétrica – MMGD e do Sistema de Compensação de Energia Elétrica – SCEE- **Resolução Normativa nº 482/2012**, Brasília, DF, Brasil, 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST**- Resolução Normativa nº 687/ 2015**, Brasília, DF, Brasil, 2015.

ATWA, Y.M.; et al., "Optimal Renewable Resources Mix for Distribution System Energy Loss Minimization", **IEEE Trans. on Power Systems**, vol. 25 (1), 2010.

BASTOS.W.S. **Estudo de Caso de um Projeto Fotovoltaico Integrado à Edificação**. Monográfica, Universidade Federal da Paraíba Centro de Energias Alternativas e Renováveis Departamento de Engenharia Elétrica. 2017. Paraíba-PB.

BAZMI, A. A.; ZAHEDI, G. "Sustainable energy systems: Role of optimization modeling techniques in power generation and supply — A review**", Renewable and Sustainable Energy Reviews** vol.15, no. 8, p. 3480-3500, 2011.

BRITSH PETROLEUM. Londres, UK, 2021. Disponível em: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>. Acesso em: 10/05/2023.

BRITSH PETROLEUM. Londres, UK, 2022. Disponível em: https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf. Acesso em: 10/05/2023.

CHIRADEJA, P; RAMAKUMAR, R "Voltage profile improvement with distributed wind turbine generation—a case study", **Proc. 2003 IEEE PES General Meeting,** vol. 4, pp. 2331-2336.

DICORATO, M.G.F.; TROVATO, M. "Environmental-constrained energy planning using energy-efficiency and distributed-generation facilities", **Renewable Energy**, Vol. 33 (6), p. 1297–1313, 2008.

ER, **Recommendations for the connection of small-scale embedded generators (up to 16 A Per Phase) in parallel with public low-voltage distribution networks** ER G83/1, The Electricity Association, Millbank, London, UK, 2003.

GAZOLI, J.R. **Micro inversor monofásico para sistema solar fotovoltaico conectado à rede elétrica**. 2011. 204 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, SP, 2011.

GEORGILAKIS, P.S.; HATZIARGYRIOU, N. D., "Optimal Distributed Generation Placement in Power Distribution Networks: Models, Methods, and Future Research," in **IEEE Transactions on Power Systems***,* vol. 28, no. 3, pp. 3420-3428, Aug. 2013.

HARRISON, G.P.; WALLACE, A.R. "Maximising distributed generation capacity in deregulated markets," **2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition** (IEEE Cat. No.03CH37495), Dallas, TX, USA, 2003, pp. 527-530 vol.2, doi: 10.1109/TDC.2003.1335329.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PESQUISA ESPACIAL (Brasil) (INPE). **Atlas Brasileiro de Energia Solar** – 2° Edição, São Jose dos Campos-São Paulo. 2017.

KIM, J.; NAM, S.; PARK, S.; SINGH, C. Dispersed generation planning using improved Hereford ranch algorithm", **Elect. Power Syst**. *Res.,* vol. 47, no. 1, pp. 47-55, Oct. 1998.

KIRTHIGA, M.V.; DANIEL, S.A.; GURUNATHAN, S.; "A Methodology for Transforming an Existing Distribution Network Into a Sustainable Autonomous Micro-Grid", **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, Vol. 4 (1), 2013.

KHATOD, D.K.; PANT, V.; SHARMA, J. "Evolutionary programming based optimal placement of renewable distributed generators," in **IEEE Transactions on Power Systems**, vol. 28, no. 2, pp. 683-695, May 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2211044.

MATOS, D.M.B; CATALÃO, J.P.S. "Geração Distribuída e seus impactos no funcionamento da Rede elétrica: Parte". **International Conference on engineering UBI2013** - 27-29– University of Beira Interior – Covilhã, Portugal, Nov. 2013.

MUHONGO, M.L.F. **Simulação de um microinversor aplicado em microgeração distribuída fotovoltaica,** Monografia (Graduação) - Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Curso Engenharia de Energia, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira. Redenção-CE, p.76. 2021.

PEPERMANNS, G *et al*. "Distributed generation: definition, benefits and issues**", energy policy** vol .33, no. 6, p. 787-798, 2005.

RAU, N. S.; WAN, Y.H. "Optimum location of resources in distributed planning," in **IEEE Transactions on Power Systems**, vol. 9, no. 4, pp. 2014-2020, Nov. 1994, doi: 10.1109/59.331463.

VOVOS, P.N. *et al*. "Optimal power flow as a tool for fault level-constrained network capacity analysis," in **IEEE Transactions on Power Systems**, vol. 20, no. 2, pp. 734-741, May 2005, doi: 10.1109/TPWRS.2005.846070.

WILLIS, H.L. “Analytical methods and rules of thumb for modeling DG-distribution interaction,” **2000 Power Engineering Society Summer Meeting** (Cat. No.00CH37134), Seattle, WA, USA, 2000, pp. 1643-1644 vol. 3, doi: 10.1109/PESS.2000.868774.

LOPES, J.A.P. *et al*. “Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities”, **Electric Power Systems Research**, Vol. 77 (9), p. 1189–1203, 2007.

CAPÍTULO 13

MODELOS ESTOCÁSTICOS DE PREVISÃO DA UMIDADE RELATIVA DO AR PARA BOA VISTA-RR

Data de submissão: 12/05/2023 *Data de aceite: 03/07/2023*

Alanderson Firmino de Lucas
http://lattes.cnpq.br/0484302300145718

Matheus Henrique Bezerra de Melo
http://lattes.cnpq.br/2538146023601236

Daniel Felipe da Silva
http://lattes.cnpq.br/9510085354088329

Thiago Gonçalves da Silva
http://lattes.cnpq.br/9247213148151165

Albert Smith Feitosa Suassuna Martins
http://lattes.cnpq.br/1571415337290282

Everton Felipe de Souza Pinheiro
http://lattes.cnpq.br/3226955524305254

Bárbara Araujo Silva
http://lattes.cnpq.br/0059136452032385

Paula Andressa Alves de Araújo
http://lattes.cnpq.br/4857107569349842

José Augusto Ferreira Neto
http://lattes.cnpq.br/0401494432064481

Israel Walter Hilário da Silva
http://lattes.cnpq.br/5659345555242426

RESUMO: Neste capítulo, foi apresentado o processo de determinação da ordem do modelo ARMA para a série temporal da Umidade Relativa do Ar de Boa Vista/RR de 1961 a 2014. Como a série já era estacionária, não foi necessária a aplicação da primeira diferença simples para torná-la estacionária. A ordem do modelo ARMA foi determinada a partir dos gráficos da PACF e da ACF, resultando na ordem (1,0,2). A série temporal apresenta flutuações sazonais com picos no verão, extremos em 1997 devido ao El Niño e alguns outliers em anos com menor variabilidade da Umidade Relativa do Ar da região. Embora a série tenha variabilidade, ela apresenta comportamento constante em torno de sua média, o que torna a configuração original praticamente a mesma se aplicada quaisquer métodos de transformação na série.

PALAVRAS-CHAVE: Métodos, estocástica, previsão**.**

STOCHASTIC MODELS FOR PREDICTING RELATIVE HUMIDITY FOR BOA VISTA-RR

ABSTRACT: In this chapter, the process of determining the order of the ARMA model for the time series of Relative Air Humidity in Boa Vista/RR from 1961 to 2014 was presented. As the series was already stationary, it was

not necessary to apply the first simple difference to make it stationary. The order of the ARMA model was determined from the PACF and ACF graphs, resulting in the order (1,0,2). The time series shows seasonal fluctuations with peaks in the summer, extremes in 1997 due to El Niño, and some outliers in years with lower variability of the Relative Air Humidity of the region. Although the series has variability, it shows a constant behavior around its mean, which makes the original configuration practically the same if any transformation methods are applied to the series.
KEYWORDS: Methods, stochastic, forecast.

INTRODUÇÃO

Boa Vista é um município brasileiro e capital do estado de Roraima, Região Norte do país, sendo a capital mais setentrional (a norte) do Brasil e situada no Hemisfério Norte.

Neste estudo, apresentamos uma análise estocástica da cidade de Boa Vista-RR para reduzir o erro de projeção em séries cronológicas ao longo do tempo. Cada situação possui um conjunto único de problemas que requerem uma previsão específica, e a solução para um caso pode não ser necessariamente a melhor para outras situações. No entanto, certos princípios gerais são comuns à maioria dos problemas e devem ser incorporados em qualquer sistema de previsão.

Embora a mesma tenha variabilidade, esta também possui comportamento constante em torno de sua respectiva média, fazendo com que a configuração original desta seja praticamente a mesma se aplicada quaisquer métodos de transformação na série em questão, por exemplo: logarítimo natural da referida série. Onde é comprovado pelos testes de estacionariedade e ao plotar a série transormada.

Modelos Estocásticos de Previsão

Não é preciso efetivar uma transformação *Box Cox* na série original, em virtude da série em questão verificar-se homocedástica, ou seja, possuir variância constante, resultado este obtido após executar o teste de *Bartlett* de homogeneidade de variâncias, o qual fornece p-valor correspondente a 0.8529, consequentemente, é possível observar ao nível de significância de 5% que o p-valor é maior, assim, não se rejeita a hipótese nula de que há variâncias homogêneas.

ARMA

Um dos objetivos dos modelos de *Box & Jenkis* é tornar a série estacionária e para isso é necessário aplicar a primeira diferença simples com o objetivo de “eliminar” a tendência, por isso, é preciso por a série original no padrão de estacionária para ajustar o modelo ARIMA e/ou SARIMA.

Devido à série temporal original em estudo apresentar-se estacionária, como comprovado através dos testes citados, assim sendo, a ordem do modelo Integrado (I, d – diferenciação) é igual à zero, já que não é necessário aplicar a primeira diferenciação

na série arrolada no estudo, uma vez que a mesma é estacionária. Desta forma, foi determinada apenas a ordem do modelo Auto Regressivo (AR, p) e a ordem do modelo de Médias Móveis (MA, q) por meio do gráfico da PACF (Auto Correlação Parcial) e da ACF (Auto Correlação Total), respectivamente. Resultando no modelo estocástico de previsão denominado ARMA, derivado do ARIMA. No caso deste modelo ARMA, foi feita a PACF e a ACF na série original, visto que não foi realizada a primeira diferenciação simples na referida série devido esta se encontrar estacionária, como mostrado a seguinte:

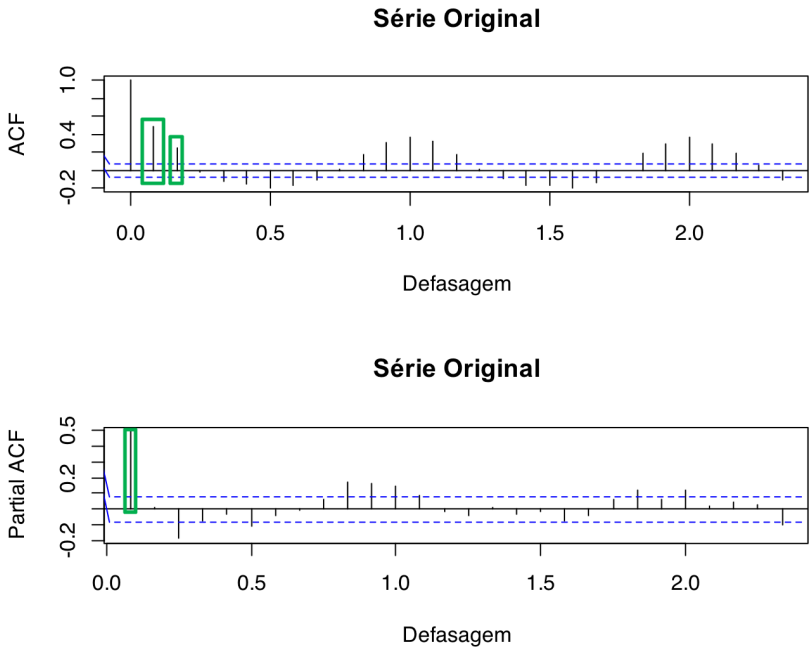


Figura 2 – ACF e PACF da série trabalhada original.

A partir dos gráficos acima se tem que o modelo é mascarado pela sazonalidade, ou seja, o modelo não está ajustado, assim, encontrando-se fora da faixa azul (Intervalo de Confiança) tanto da ACF quanto da PACF, não aleatório, dependente temporalmente e havendo significância na correlação com defasagem na sazonalidade, exceto com lag 0 que apresenta correlação significativa igual a 1 devido correlacionar a variável da série temporal gerada com ela mesma.

Desta forma, sabendo-se também que esta ordem é designada com o objetivo do modelo ser o mais parcimonioso possível, ou melhor, modelo explicado por menos parâmetros (menor ordem), então, para determinar a ordem p,d,q simples com lags sucessivos do modelo ARMA da série em questão foi feita a contagem dos lags mais significativos, isto é, com maior correlação na significância estatística (o que extrapola o intervalo de confiança), sendo que para o modelo auto regressivo (p, correlacionando com a própria variável com defasagem no tempo) visto através da PACF a ordem é 1,

pois é o único lag mais significativo logo após o primeiro lag, e para o modelo de médias móveis (q, correlacionando com o efeito aleatório) é definido aproximadamente no gráfico da ACF ordem 2, dado que também são os lags mais significativos após o lag 0 que tem correlação igual a 1 e também pelo fato da correlação decrescer exponencialmente, a medida que aumenta as defasagens no tempo, assim sendo, os pontos posteriores tem menor significância e, consequentemente, menor correlação. Logo, a ordem p, d, q do modelo ARIMA corresponde a (1,0,2), como d (I, modelo Integrado) equivale a 0 o modelo é denominado ARMA.

Ajuste do Modelo ARMA

Em seguida, foi estimado o possível modelo ARMA da referida série com a ordem proposta a anterior. Observando se na ACF os resíduos com lag igual a 1 são estatisticamente iguais ou não a zero, indicando que os resíduos são correlacionados ou não e verificando também por meio da estatística do Teste de independência *Ljung-Box* do modelo que os valores-p são baixos ou elevados, além de mostrar os resíduos padronizados, através do tsdiag, cujo gráfico é exposto abaixo:

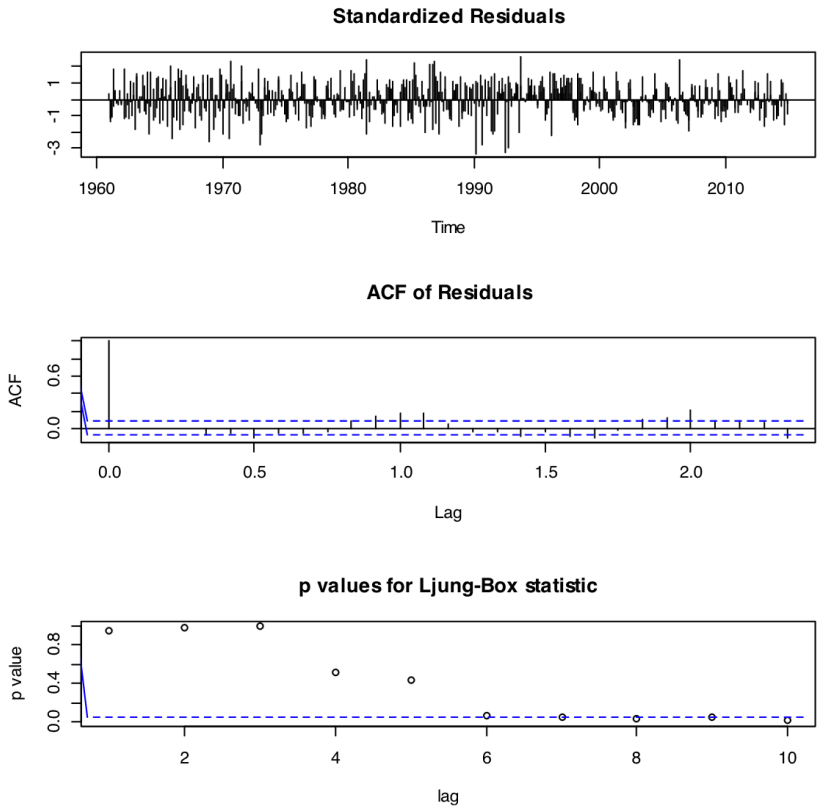


Figura 3 – Resíduos Padronizados, ACF dos resíduos e p-valor para Estatística *Ljung-Box* do modelo ARMA ajustado da série trabalhada original.

Averiguou-se que no modelo ARMA a ACF mostra que grande parte dos resíduos com lag igual a 1 não são estatisticamente iguais a zero, isto significa, são correlacionados por saírem do intervalo de confiança (significância na correlação) e a maioria dos valores da estatística de *Ljung-Box* são muito pequenos, deste modo, os erros são dependentes ao longo do tempo, e o modelo será descartado.

Portanto, o modelo ARMA é o modelo candidato para análise, desde que calcule a significância dos coeficientes do referido modelo.

AR1	MA1	MA2
4.048138e-02	2.537966e-03	1.453419e-06

Tabela 1– Coeficientes do modelo ARMA estimado da série original.

Nota-se que os coeficientes do modelo ARMA são todos significantes, visto que todos os coeficientes do modelo em estudo apresentam valor menor do que o nível de significância de 0,05.

Previsão do Modelo ARMA

Feitas todas as analises anteriores e não sendo violada nenhuma das suposições é possível fazer previsão de um ano para 2015 baseados no modelo ARMA.

Aplicando o *predict* para a previsão do modelo, calculando o intervalo de confiança (IC) com nível de confiança de 95% e criando um *dataframe* das previsões com seus respectivos IC, tem-se que:

	Point Forecast
JAN 2015	72.42288
FEB 2015	73.61124
MAR 2015	75.40857
APR 2015	75.74983
MAY 2015	75.81462
JUN 2015	75.82693
JUL 2015	75.82926
AUG 2015	75.82970
SEP 2015	75.82979
OCT 2015	75.82980
NOV 2015	75.82981
DEC 2015	75.82981

Tabela 2 – Previsão do Modelo ARMA para 2015.

A previsão foi realizada para todo o ano de 2015, a fim de que seja avaliado o desempenho do Modelo ARMA. Para melhor análise do gráfico da previsão a posteriori e como forma de comparação com dados reais é tida a visualização dos valores da previsão, como é exibido na Tabela 4.

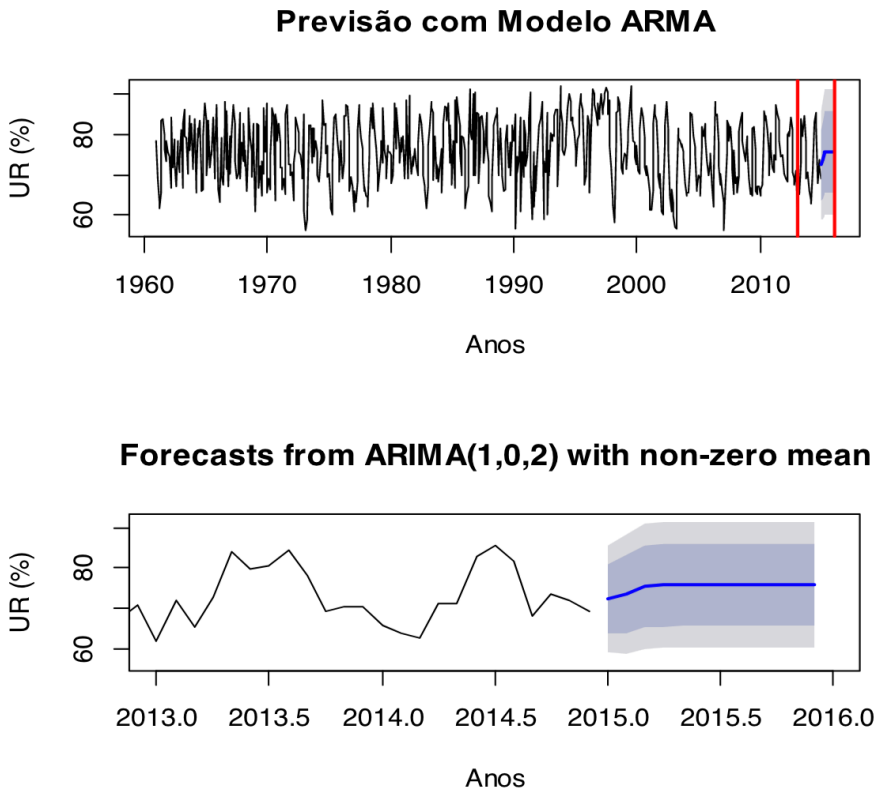


Figura 4 – Gráfico da previsão do Modelo ARMA da série de Umidade Relativa de Boa Vista-RR para 2015.

É notado que este modelo de previsão subestima a umidade relativa do ar da capital Roraimense nos meses correspondentes ao período chuvoso e superestima nos demais meses do ano.

SARIMA

Embora a série temporal original debatida seja estacionária, ainda é possível visualizar a sazonalidade na mesma, desta forma, como o modelo de previsão SARIMA é ajustado com sazonalidade é necessário aplicar a primeira diferenciação sazonal para tornar a série mais aleatória e, assim, definir a ordem do presente modelo. Além do que, foi feita a PACF e a ACF da série com a primeira diferenciação sazonal, como configurado abaixo:

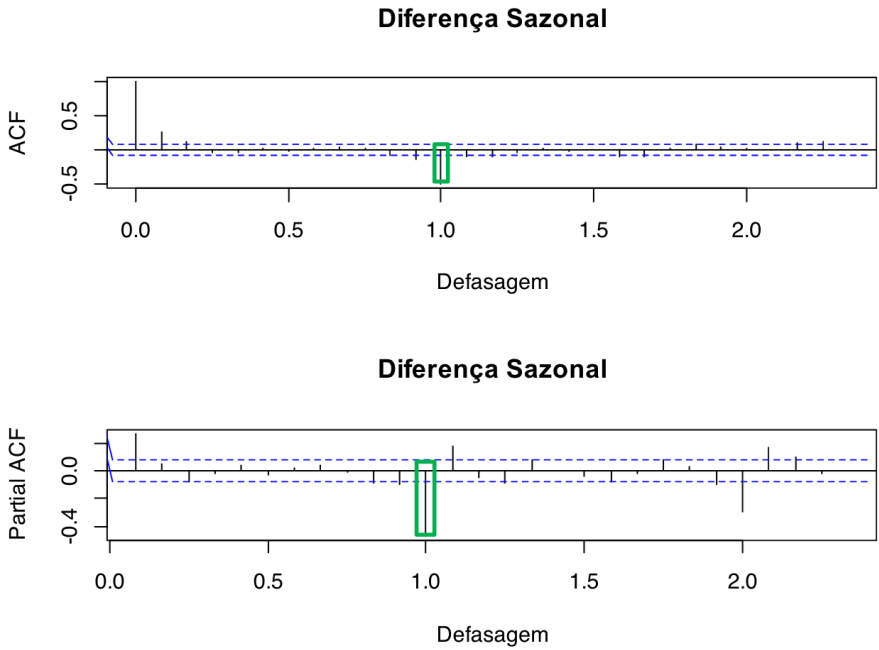


Figura 5 – ACF e PACF da série com diferenciação sazonal.

Com base na Figura 23 tem que o modelo encontra-se exterior a faixa azul (Intervalo de Confiança) no gráfico da ACF e da PACF, de modo que este modelo é dependente por toda extensão de tempo e possui significância na correlação com defasagem sazonal.

Para definir a ordem P, D, Q com lags sazonais do modelo SARMA da série em questão foi obtida a contagem dos lags mais significativos, sendo que para o modelo auto regressivo (P) a ordem é 1, pois o lag sazonal 12 é o mais significativo da defasagem sazonal de 1 a 12, e para o modelo de médias móveis (Q) é definido próximo a ordem 1, dado que também é o lag sazonal 12 mais significativo da sazonalidade de lag 1 a 12 e após o lag 0 que tem correlação igual a 1. Então, a ordem P, D, Q do modelo SARIMA corresponde a (1,1,1), sabendo-se que D (I, modelo Integrado) é correlato a 1, em razão de ter aplicado somente a primeira diferenciação sazonal.

É primordial verificar se a série após a diferenciação sazonal tem padrão de estacionária, para isso é testado esta condição a partir dos tres testes de estacionariedade na mesma série, cujos testes são os de ADF, PP e o KPSS, se teve os resultados a seguir do p-valor: 0.01, 0.01 e 0.1. Assim, pode-se declarar que logo após os testes se tem que a série com diferenciação sazonal é estacionária, uma vez que o p-valor é menor do que o nível de significância (0,05) no teste de ADF e PP, rejeitando a hipótese nula de que a série não é estacionária e o p-valor é maior do que o nível de significância de 5% no teste de KPSS, não rejeitando H_0, onde esta hipótese diz que a série é estacionária, como comprovado na figura a diante:

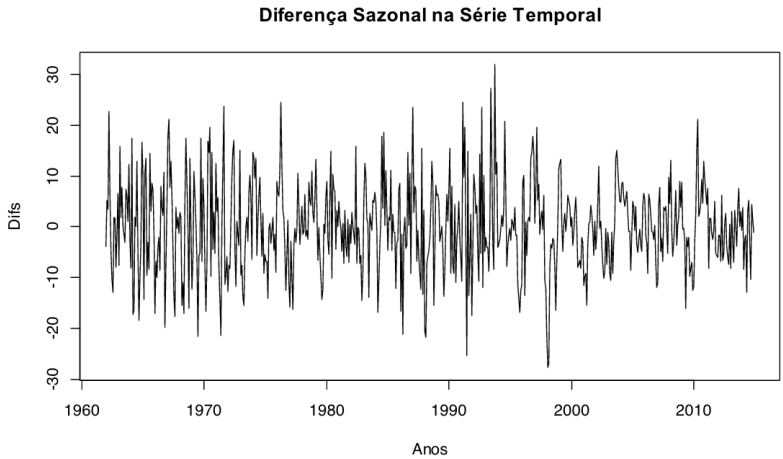


Figura 6 – Série com diferenciação sazonal.

Ajuste do Modelo SARIMA

Neste momento foi ajustado o modelo SARMA da série original com a ordem designada anteriormente. Observando os resíduos padronizados, a ACF dos resíduos e o comportamento do p-valor do teste *Ljung-Box* de independência dos erros por meio da função tsdiag, onde é gerado o gráfico inferiormente.

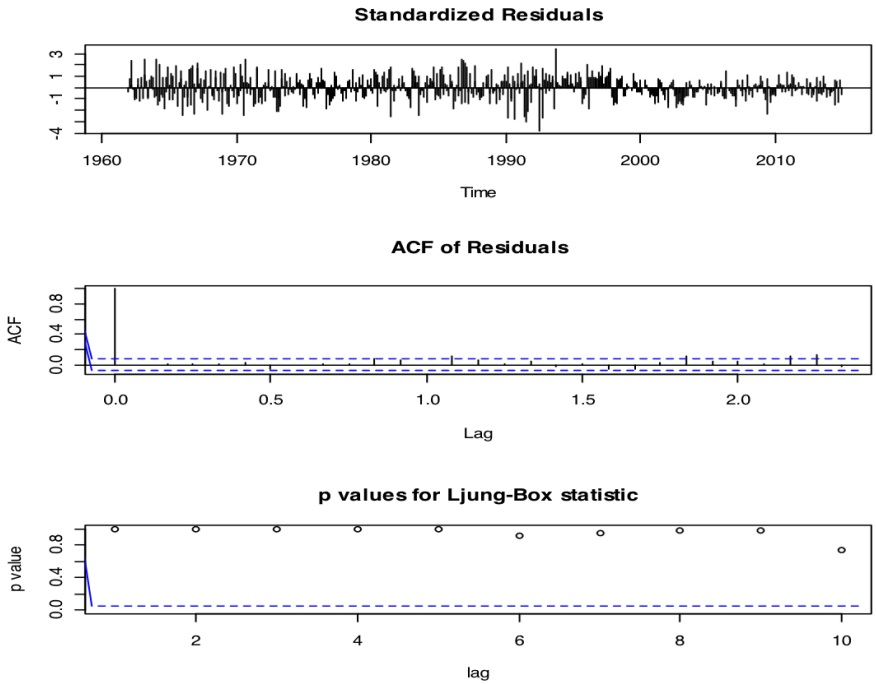


Figura 7 – Resíduos Padronizados, ACF dos resíduos e p-valor do teste de *Ljung-Box* do modelo SARIMA ajustado da série trabalhada original.

Constatou-se que a ACF dos resíduos do modelo SARIMA demonstra que os resíduos com lag igual a 1 não são estatisticamente iguais a zero, isto é, são correlacionados por não ultrapassarem o intervalo de confiança e os valores do teste de *Ljung-Box* são elevados, por conseguinte, os erros são independentes ao longo do tempo, onde será melhor especificado na análise dos resíduos, posteriormente.

O modelo SARIMA é candidato para análise, sendo que é preciso calcular a significância dos coeficientes do modelo investigado, como apresentado na Tabela 5:

AR1	MA1	MA2	SAR1	SMA1
2.115215e-01	1.282862e-01	2.261688e-03	3.558653e-01	2.638393e-140

Tabela 3 – Coeficientes do modelo SARIMA estimado da série original.

Compreende-se que a maioria dos coeficientes do modelo SARIMA não são significantes, visto que mais da metade dos coeficientes do modelo averiguado possuem valor maior do que o nível de significância de 5%.

Análise dos Resíduos

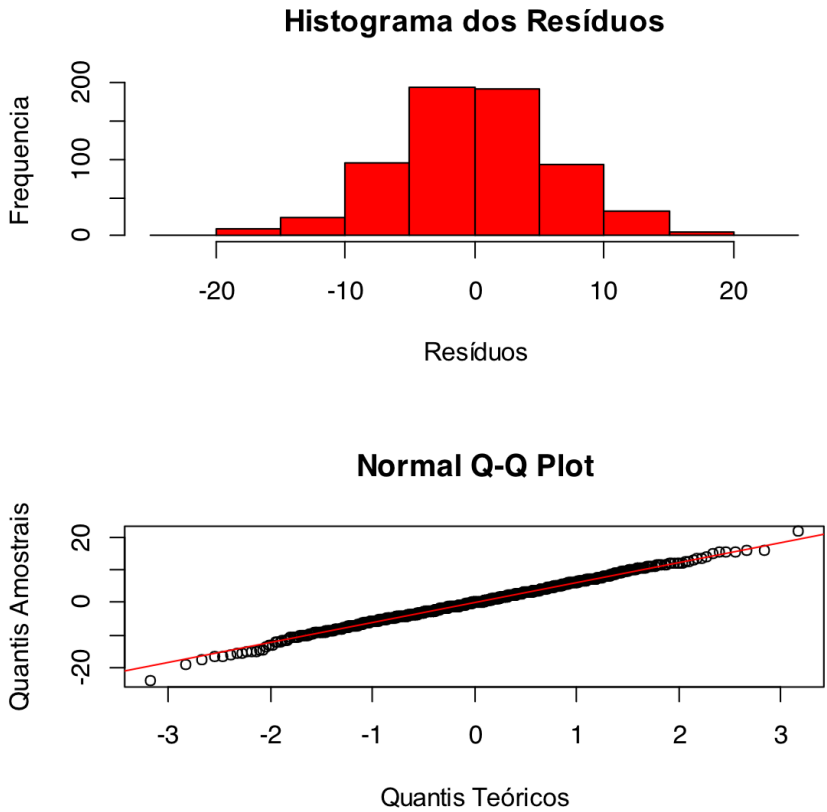


Figura 8 – Histograma e Normal Q-Q Plot dos resíduos do Modelo SARIMA.

A Figura 26 evidencia graficamente que os resíduos seguem uma distribuição normal por consequência da simetria da distribuição dos erros, como revelado no Histograma, além disso, pelo motivo de uma reta se ajustar bem a todos os erros, porém se irá aplicar o teste de *Shapiro-Wilk* para confirmar. Onde se verifica ao nível de significância de 0,05 que não se rejeita a hipótese nula de que os erros seguem uma distribuição normal, pois o p-valor é maior do que o nível de significância citado (0.5127>0,05), quer dizer, os resíduos vêm de uma distribuição normal, comprovando a análise gráfica.

Desta forma, a média dos erros é similar à zero (-0.05) e a variância dos resíduos do modelo desenvolvido não é homogênea, portanto, logo depois de submeter ao teste de *Bartlett* resultou-se no p-valor de 2.2e-16, com isso, repara-se que ao nível de significância de 5% o p-valor é menor, isto posto, se rejeita a hipótese nula de que há variâncias homogêneas, desse jeito, não possui variância constante.

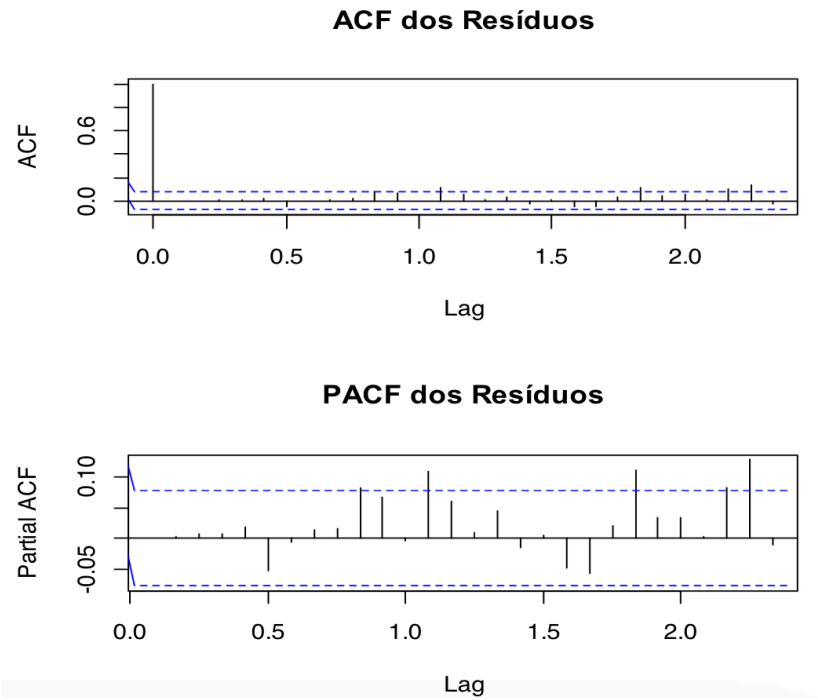


Figura 9 – ACF e PACF dos resíduos do Modelo SARIMA.

Baseando-se na Figura 27 é correto afirmar que a maioria dos resíduos encontra-se dentro da faixa azul (Intervalo de Confiança) na ACF e na PACF, embora haja lags que ultrapassem o intervalo de confiança, estes atingem uma correlação muito pequena, sendo estes irrelevantes, consequentemente, não havendo significância na correlação com defasagem igual a 1 na sazonalidade, que por sua vez são estatisticamente iguais a zero, isto quer dizer que os erros não são correlacionados e o teste de *Ljung-Box* concede

p-valor proporcional a 0.2081, então, é maior do que o nível de significância de 5% e há evidencias suficientes para não rejeitar a hipótese nula que os erros são independentes e identicamente distribuídos, logo, os mesmos são independentes temporalmente.

Previsão do Modelo SARIMA

	Point Forecast
JAN 2015	68.45529
FEB 2015	67.78420
MAR 2015	67.25075
APR 2015	74.94270
MAY 2015	81.19612
JUN 2015	82.86798
JUL 2015	83.46412
AUG 2015	80.23754
SEP 2015	74.39992
OCT 2015	72.20200
NOV 2015	72.58995
DEC 2015	72.15019

Tabela 4 – Previsão do Modelo SARIMA para 2015.

A previsão também foi feita para todo o ano de 2015, para que seja validado o desempenho do Modelo SARIMA. Os valores da previsão mensal para 2015 são vistos na Tabela 6.

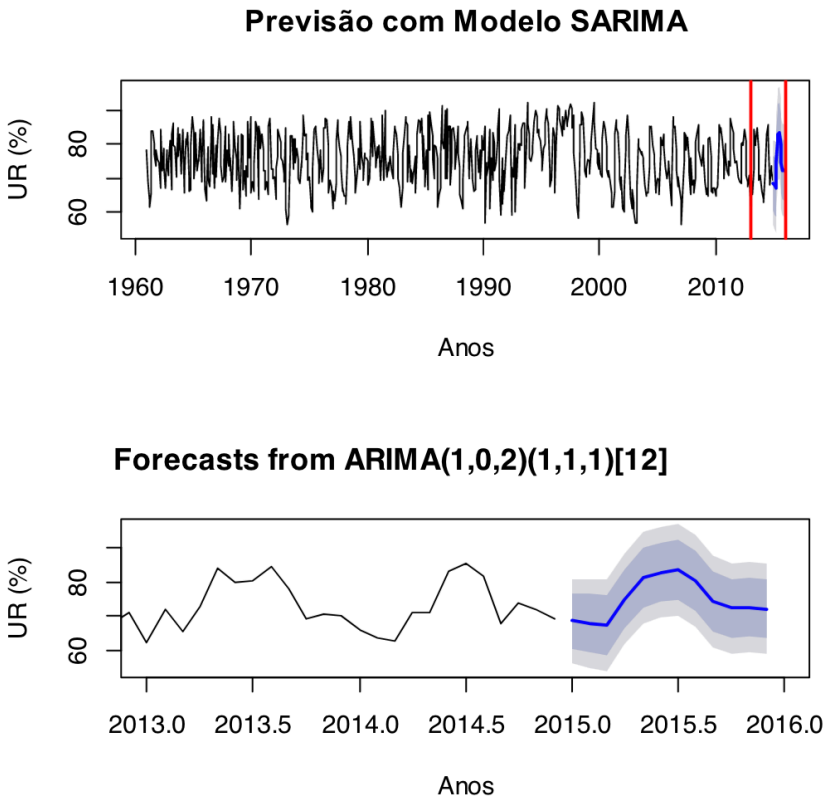


Figura 10 – Gráfico da previsão para 2015 do Modelo SARIMA da série de Umidade Relativa de Boa Vista-RR.

Neste modelo de previsão subestima a umidade relativa de Boa Vista-RR na maior parte do ano, exceto nos meses de Maio, Junho, Julho e Agosto que equivalem aos meses da quadra chuvosa na cidade, onde neste mesmo período superestima ou estima proporcional ao dado observado em determinado mês.

	ME	RMSE	MAE	MPE	MAPE	MASE	AIC
ARMA	-0.0033	6.529988	5.305245	-0.7870	7.140206	0.8661656	4334.9
SARIMA	-0.0552	6.25744	4.92734	-0.7682	6.63293	0.804467	4183.9

Tabela 7 – Medidas de Diagnóstico dos Modelos ARMA e SARIMA.

Tendo em vista a análise dos resíduos e os coeficientes de cada modelo e a Tabela 7 pode-se atestar que o melhor modelo de previsão é o SARIMA, embora não tenha significância em todos os coeficientes do modelo, é o modelo que está dentro de quase todos os pressupostos de normalidade, apenas não possui variância constante, este também presenta menor AIC e se aproxima mais do erro igual a 0 em quase todas as medidas de diagnóstico, exceto no Erro Médio.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao plotar a série temporal da Umidade Relativa do Ar de Boa Vista/RR de 1961 a 2014, pode-se verificar que esta série poderia ser descrita desde flutuações aleatórias a flutuações sazonais, onde os dados são bruscamente constantes. Com pico em todo verão. Além disso, há extremos, especialmente, em 1997 devido ao El Niño intenso que ocorreu de meados de 1997 a 1998 e a série em estudo também contém alguns *outliers* (valores atípicos), onde todos são notados em anos com menor variabilidade da Umidade Relativa do Ar da região, sendo estes abaixo do normal para a região no período de El Níño e acima do esperado, como ocorreu em 1971 e 1979. O nível desta série temporal apresenta constante com variabilidade.Embora a mesma tenha variabilidade, esta também possui comportamento constante em torno de sua respectiva média, fazendo com que a configuração original desta seja praticamente a mesma se aplicada quaisquer métodos de transformação na série em questão, por exemplo: logarítimo natural da referida série. Onde é comprovado pelos testes de estacionariedade e ao plotar a série transformada.

REFERÊNCIAS

BANG, Shivam et al. Fuzzy Logic based Crop Yield Prediction using Temperature and Rainfall parameters predicted through ARMA, SARIMA, and ARMAX models. In: **2019 Twelfth International Conference on Contemporary Computing (IC3)**. IEEE, 2019. p. 1-6.

DIGUP, Estatcamp e. **Portal Action.** Disponível em: <http://www.portalaction.com.br/>. Acesso em: 12 out. 2015.

TIBULO, Cleiton. **Modelos de séries temporais aplicados a dados de umidade relativa do ar.** Disponível em: <http://www.revistaespacios.com/a14v35n06/14350622.html>. Acesso em: 12 out. 2015.

LUCAS, Edmundo Wallace Monteiro. **Modelagem hidrológica determinística e estocástica aplicada a região hidrográfica do Xingu - Pará.** Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbmet/v24n3/a05v24n3>. Acesso em: 12 out. 2015.

HENRIQUE AJUZ HOLZMANN - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Tecnologia em Fabricação Mecânica e Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Doutor em Engenharia e Ciência do Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Trabalha com os temas: Revestimentos resistentes a corrosão, Soldagem e Caracterização de revestimentos soldados.

GÉSSICA KATALYNE BILCATI - Professora do Curso de Engenharia Civil na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Guarapuava. Possui Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Pará (UFPA). Mestrado em Engenharia Civil com ênfase em Materiais e Componentes de Construção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Curitiba. Desenvolveu pesquisas relacionadas à painéis cimento-madeira. Atualmente é doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Paraná (UFPR), na área de compósitos cimentícios com adição de materiais celulósicos.

ÍNDICE REMISSIVO

A

Adsorção 99, 103, 104, 105, 108, 109, 110

Arrabidaea chica 111, 115

B

Bambu 74, 76, 77, 78, 79, 80

C

Cationização 111, 113, 115

Construção Civil 75, 80, 116, 117, 118, 121, 122, 123, 124, 125, 126

Corante Natural 111

E

Ecológico 74, 129

Eficiência Energética 116, 117, 119, 120, 122, 123, 125, 130, 133

Energia Solar Fotovoltaica 122, 127, 128

Ensino Universitário 48, 49, 50, 51

Estocástica 140, 141, 152

F

Flexão 71, 74, 77, 78, 79, 80

G

Geração Distribuída 120, 127, 128, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138

I

Impressão 3D 5, 6, 7, 8, 10, 15, 16, 61, 62, 63, 66, 72, 73

Indústria 2, 3, 5, 19, 20, 30, 53, 55, 58, 61, 80, 115, 117, 118, 123, 124, 125, 126

L

Liga Alumínio 18, 20, 21

M

Manufatura Aditiva 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 11, 13, 14, 15, 61, 62, 63, 73

Mecanismos de Corrosão 17, 18, 20, 21, 23, 27, 28

Metacaulim 103, 104, 106, 107, 108

Microestrutura 16, 18, 19, 22, 23

Minerais 80, 103

O

Otimização 3, 127

P

Previsão 118, 140, 141, 142, 144, 145, 150, 151

Processo de Fabricação 2, 4, 8, 9, 13, 14, 15, 62

Prototipagem 56, 61, 62, 73

R

Rede Elétrica 127, 130, 131, 132, 134, 135, 138

Resíduo 74, 76, 77, 78, 79, 80, 103

Robótica 48, 49, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59

S

Sistemas Computacionais Inteligentes 49, 52, 53

Soldagem MIG 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29

Soluções Problemas 49

Sustentável 74, 115, 116, 123, 124, 125, 127, 133, 136, 138

T

Tecnologias Inovadoras 116

Tingimento 111, 112, 113, 114, 115

Tomografia Computadorizada 2, 4, 8, 11, 12, 13, 14, 15

Z

Zeólitas 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109

www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br
@atenaeditora
www.facebook.com/atenaeditora.com.br

ENGENHARIAS:

DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS E PRODUTOS

3

Atena Editora
Ano 2023

www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br
@atenaeditora
www.facebook.com/atenaeditora.com.br

ENGENHARIAS:

DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS E PRODUTOS

3

Atena Editora
Ano 2023