



ENSUS

2024

ANAIS

ISBN 978-65-01-11164-3
ISSNe 2596-237X

V. 12, N. 1
Parte 2
2024



ENSUS 2024

XII ENCONTRO DE SUSTENTABILIDADE EM PROJETO

07 A 09 DE AGOSTO DE 2024
BELO HORIZONTE, MINAS GERAIS

ORGANIZAÇÃO:

Lisiane Ilha Librelotto
Paulo Cesar Machado Ferroli
Sofia Araújo Lima Bessa

EDITOR:

Grupo de Pesquisa VirtuHab/Universidade Federal de Santa Catarina
Universidade Federal de Minas Gerais

DIAGRAMAÇÃO:

Ernestina Rita Meira Engel

REALIZAÇÃO:



UNIVERSIDADE FEDERAL
DE MINAS GERAIS
Escola de Arquitetura - **UFMG**



Escola de Design - **UEMG**



Universidade Federal de Santa
Catarina - **UFSC**

FINANCIADORES:



Conselho Nacional de
Desenvolvimento Científico e
Tecnológico - **CNPq**



Fundação de Amparo à Pesquisa
do Estado de Minas Gerais -
FAPEMIG



APOIOS INSTITUCIONAIS:



Grupo de Pesquisa **VirtuHab**



Departamento de Engenharia de
Materiais e Construção - **DEMC**



Programa de Pós-graduação em Ambiente
Construído e Patrimônio Sustentável -
PPG-ACPS



Programa de Pós-Graduação em Design

Programa de Pós-Graduação
em Design - **UEMG**



PROMESTRE - Mestrado
Profissional Educação e Docência



Mestrado em
Construção Civil - **DEMC**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Encontro de Sustentabilidade em Projeto (12. :7-9
ago. 2024 : Belo Horizonte, MG)
ENSUS 2024 [livro eletrônico] : XII Encontro de
Sustentabilidade em Projeto : anais da conferência /
organização Lisiane Ilha Librelotto, Paulo Cesar
Machado Ferroli, Sofia Lima Araújo Bessa ; editor
Grupo de Pesquisa Virtuhab/ Universidade Federal de
Santa Catarina, Universidade Federal de Minas Gerais.
-- Florianópolis, SC : Ed. dos Autores, 2024. --
(ENSUS: Encontro De Sustentabilidade Em Projeto ; 12)
PDF

Vários autores
ISBN 978-65-01-11164-3

1. Arquitetura - Congressos 2. Design - Congressos
3. Engenharia 4. Sustentabilidade 5. Urbanismo
I. Librelotto, Lisiane Ilha. II. Ferroli, Paulo Cesar
Machado. III. Bessa, Sofia Lima Araújo. IV. Grupo de
Pesquisa Virtuhab/ Universidade Federal de Santa
Catarina. V. Gerais, Universidade Federal de Minas
gerais. VI. Título. VII. Série.

24-219802

CDD-720.03

Índices para catálogo sistemático:

1. Arquitetura : Congressos 720.03

Eliane de Freitas Leite - Bibliotecária - CRB 8/8415

COMISSÃO ORGANIZADORA

Sofia Araújo Lima Bessa / Arquitetura/UFMG

Doutora em Engenharia Urbana pela Universidade Federal de São Carlos (2011), com Estágio de Doutorado no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, Portugal (2010-2011); Mestre em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia pela Universidade de São Paulo (2008) e graduada em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal do Ceará (2006). Professora da UFMG, no Departamento de Tecnologia do Design, da Arquitetura e do Urbanismo desde 2016.

Maria Teresa Paulino Aguiar / Engenharia/UFMG

Graduada em Engenharia e tem Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas pela UFMG (1995). Atualmente é Professora Titular na UFMG, e leciona e orienta nos programas de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Construção Civil e Inovação Tecnológica e Biofarmacêutica. Leciona e tem trabalhos de pesquisa e extensão em Estrutura e Comportamento Mecânico dos Materiais Cimentícios e Metálicos, e Sustentabilidade das Edificações. Coordena o Grupo NOC - Novos Olhares sobre a Construção e o Cidadão, e o Laboratório de Caracterização de Materiais de Construção Civil e Mecânica do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da UFMG.

Rejane Magiag Loura / Arquitetura/UFMG

Professora associada da Universidade Federal de Minas Gerais atuando nos cursos de Graduação em Arquitetura e Urbanismo e no Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável. Se graduou em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal de Minas Gerais onde também defendeu o mestrado e doutorado no Programa de Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares. Coordena o Programa de Extensão COMPASSO UFMG e desenvolve projetos de pesquisa nas seguintes linhas temáticas: abordagem integrada de eficiência energética, conforto ambiental e tecnologia da construção com vistas a resiliência de edificações e cidades frente às mudanças climáticas.

Fernando do Couto Rosa Almeida / Engenharia/UFMG

Professor de Engenharia Civil (EE-UFMG). Engenheiro Civil (UFSCar), com intercâmbio acadêmico na Universidade de Coimbra (Portugal). Mestre em Construção Civil (UFSCar). PhD em Built Environment (Glasgow Caledonian University, Escócia), com período sanduíche na Università Politecnica de Marche (Itália). Pós-doutorado pelo IPT e UFSCar. Vencedor do Prêmio Capes Natura-Campus de Excelência em Pesquisa 2015. Membro ativo de comitês técnicos da RILEM e IBRACON/ALCONPAT.

Fernando José da Silva / Design/UFMG

Professor Associado da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Doutor em Engenharia de Estruturas pela UFMG (2014). Pós-Doutorado na Universidade da Beira Interior, UBI, em Portugal. Atua no curso de graduação em Design e Arquitetura, e na Pós-Graduação na linha de pesquisa Design e Educação, Programa de Mestrado Profissional Educação e

Docência Promestre, da Faculdade de Educação (FaE-UFMG), com Graduação e Mestrado em Design pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP). Coordena o Laboratório de Design e Biomimética LDBio com a profª Drª Cynara Fiedler Bremer (EA-UFMG).

Nadja Maria Mourão / Design/UEMG

Doutora e mestra Design (PPGD/UEMG), Pós-doutorado em Design (PPGDg/UFMA - Bolsista CAPES-PROCAD), Pós-Graduação em Arte Educação (FAE/UEMG), bacharelado em Design de Ambientes (FUMA/MG). Professora da Escola de Design da UEMG, desde 1997. Coordenadora do Centro de Extensão da Escola de Design/UEMG. Líder do Grupo de Pesquisa CNPq: Estudos em Design, Comunidades, Tecnologias Sociais e Iniciativas Sustentáveis/DECTESIS e do grupo: Design, Identidade e Território – DIT. Consultora e gestora de projetos em design social.

Kátia Andréa Carvalhaes Pêgo / Design/UEMG

Designer de Produto (UEMG – 1996), possui especialização em Planejamento e Gestão Ambiental (Uni-BH – 1999), mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável (UFMG – 2010), doutorado em Systemic Design (POLITO – 2016) e pós-doutorado junto ao Laboratório de Estudos Integrados em Arquitetura, Design e Estruturas (LADE) - UFMG (2023). Na Escola de Design da UEMG atua como pesquisadora e professora, na Graduação e no Programa de Pós-Graduação em Design). Coordena e participa de projetos de pesquisa e de extensão. Possui 4 registros de Desenho Industrial e 3 Patentes. Atua principalmente nos seguintes temas: Abordagem Sistêmica, Design Sistêmico, Design para Sustentabilidade, Design e Território, Desenvolvimento Local, Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), Resiliência Urbana, Comunidades Criativas, Outras Economias, Cultura Material e Imaterial, Design de Produto.

Paulo Cesar Machado Ferrolli / Design/UFSC

Coordenador do projeto ENSUS, Pós-doutor em Design Cerâmico (Ipleiria/Portugal, 2019); Doutor em Engenharia de Produção (UFSC, 2004), Mestre em Engenharia de Produção na área de Design de Produto (UFSC, 1999), Especialista em Gestão da Qualidade (UFSC, 1997) e Engenheiro Mecânico (UFSC, 1995)

Lisiane Ilha Librelotto / Arquitetura e Urbanismo/UFSC

Coordenadora do projeto ENSUS, Pós-Doutora em Construção Sustentável (Ipleiria/ESTG-Leiria/Portugal, 2019), Doutora em Engenharia de Produção (UFSC, 2005), Mestre em Engenharia de Produção na área de Avaliação e Inovação Tecnológica (UFSC, 1999), Especialista em Gestão da Qualidade (UFSC, 1997) e Engenheira Civil (UFSC, 1995)

COMITÊ CIENTÍFICO

COORDENAÇÃO

Lisiane Ilha Librelotto, UFSC

Paulo Cesar Machado Ferroli, UFSC

REVISORES ENSUS 2024

Adhemar do Valle Filho, UFSC

Adriane Shibata Santos, UNIVILLE

Aguinaldo dos Santos, UFPR

Almir Barros da S. Santos Neto, UFSM

Amilton José Vieira de Arruda, UFPE

Ana Elisa Moraes Souto, UFSM

Ana Carolina de Moraes Andrade Barbosa, UFPE

Ana Carolina Kalume Maranhão, UnB

Ana Claudia Maynardes, UnB

Ana Kelly Marinowski Ribeiro, UFSC

Ana Maria Denardi Piccini, UEL

Ana Paula Silveira dos Santos, UNISINOS

Ana Veronica Pazmino, UFSC

Anna Cristina Ferreira, UNICAMP

Anneli Maricielo Cárdenas Celis, UNIFAP

Anderson Saccol Ferreira, UNOESC

Anderson Wolenski, IFSC

André Canal Marques, UNISINOS

André Mol, UFJF

Andrea Jaramillo Benavides, PUC - Equador

Andreia Mesacasa, IFRGS

Anerose Perini, UNIRITTER

Angela do Valle, UFSC

Anja Pratschke, USP

Antonio Erlindo Braga Júnior, UEPA

Antônio Roberto Miranda de Oliveira, UFCG

Arnoldo Debatin Neto, UFSC

Áurea Luiza Quixabeira Rosa e Silva Rapôso, IFAL

Barbara de Oliveira e Cruz, PUC-Rio

Beany Monteiro, UFRJ

Bruna Lummertz Lima - IFSC

Carla Arcoverde de Aguiar Neves, IFSC

Carla Pantoja Giuliano, FEEVALE

Carlos Alberto Mendes Moraes, UNISINOS

Carlos Humberto Martins, UEM

Carlo Franzato, PUC-Rio

Celso Salamon, UTPF

Chrystianne Goulart Ivanoski, UFSC

Cláudia Queiroz Vasconcelos, UNIFESSPA

Cláudio Pereira de Sampaio, UEL

Cristiano Alves da Silva, UFSC

Cristina Colombo Nunes, UFSC

Cristine do Nascimento Mutti, UFSC

Cyntia Santos Malaguti de Sousa, FAU/USP

Daniel Malaguti Campos, PUC-Rio

Danielle Guimarães, UFPE

Danilo Corrêa Silva, UNIVILLE

David de Andrade Costa, IFF

Dayane Cabral Ziegler, UERJ

Debora Barauna, UNISINOS

Devis Luis Marinowski, UFSC

Denise Dantas, USP

Douglas Luiz Menegazzi, UFSC

Edmilson Rampazzo Klen, UFSC

Elizabeth Romani, UFRN

Ernestina Rita Meira Engel, UFSC

Everton Randal Gavino, USP

Fabiolla Xavier Rocha Ferreira Lima, UFG

Fabiola Reinert, UFSC

Fernanda Grossi, IFF

Fernando Silva, UFMG

Franciele Menegucci, UEL

Francisco Lopes, UFMG

Francisco de Assis Sousa Lobo, UFM

Gabriel Cremona Parma, UNISUL

Gabriela Willemann Siviero Máximo, Centro Universitário Estácio/SC

Germannya D'Garcia de Araújo Silva, UFPE

Giane de Campos Grigoletti, UFSM

Gogliardo Vieira Maragno, UFSC

Helena Maria Coelho da Rocha Terreiro Galha Bártolo, IFLeia/Portugal

Henrique Lisbôa da Cruz, UNISINOS

Ítalo de Paula Casemiro, UFRJ

Ivan Luiz de Medeiros, UFSC

Jaqueline Dilly, UFRGS

Jacqueline Keller, ABEPEM

Jairo da Costa Junior, UT/Holanda.

Jocelise Jacques de Jacques, UFRGS

Joel Dias da Silva, FURB

José Guilherme Santa Rosa, UFRN

José Manuel Couceiro Barosa Correia Frade, IFLeia/Portugal

Josiane Vieira, UFSC

Juliane Almeida, UFSC

Júlio Cezar Augusto da Silva, INT/Brasil

Julio César Pinheiro Pires, UFSM

Kátia Broeto Miller, UFES

Laise Novellino Nunes de Souza, IFF

Lara Lima Felisberto, UFSC

Letícia Mattana, UFSC

COMITÊ CIENTÍFICO

REVISORES ENSUS 2024

Leticia Teixeira Mendes, UFPE
Liliane Iten Chaves, UFF
Lisandra de Andrade Dias, UFSC
Lisiane Ilha Librelotto, UFSC
Luana Miranda Esper Kallas, UFG
Luana Toralles Carbonari, UEM
Lucas Rodrigo Nora, UFSC
Luciana de Figueiredo Lopes Lucena, UFRN
Luciano Patrício Castro, UFSC
Luiz Salomão Ribas Gomez, UFSC
Luiz Valdo Alves Maciel Filho, UFPE
Luiz Paulo de Lemos Wiese, UNIVILLE
Mara Regina Pagliuso Rodrigues, IFSP
Mariana Almeida Da Silva, UFSM
Mariana Kuhl Cidade, UFSM
Marli Teresinha Everling, UNIVILLE
Marília Matos Gonçalves, UFSC
Marivaldo Wagner Sousa Silva, UFPB
Matheus Barreto de Góes, UFMG
Miguel Barreto Santos, IPLeia/Portugal
Mônica Maranhã Paes de Carvalho, IESB
Nadja Maria Mourão, UEMG
Natali Abreu Garcia, PUC-Rio

Patricia Freitas Nerbas, UNISINOS
Paulo Cesar Machado Ferroli, UFSC
Rachel Faverzani Magnago, UNISUL
Raquel Diniz Oliveira, CEFETMG
Regiane Trevisan Pupo, UFSC
Régis Heitor Ferroli, UNIVALI
Rita de Castro Engler, UEMG
Rodrigo Catafesta Francisco, FURB
Rosangela Miriam Lemos Oliveira Mendonca, UEMG
Sara Honorato Lopes da Silva Tamura, UTFPR
Sérgio Ivan dos Santos, UNIPAMPA
Simone Grace de Barros, UFPE
Sofia Lima Bessa, UFMG
Suzana Barreto Martins, UFPR
Tarcisio Dorn de Oliveira, UNIJUÍ
Tomás Queiroz Ferreira Barata, FAU/USP
Ugo Leandro Belini, UTFPR
Vanessa Casarin, UFSC
Vicente de Paulo Santos Cerqueira, UFRJ
Virginia Cavalcanti, UFPE
Victor Hugo Souza de Abreu,
Vinícius Albuquerque Fulgêncio, UFPE

PROGRAMAÇÃO DIA 07/08

AUDITÓRIO				
8:00 h - 9:00 h	Credenciamento			
9:00 h - 9:15 h	Abertura do ENSUS 2024 - AUDITÓRIO			
9:00 h - 10:00 h	Palestra de Abertura - Sustentabilidade urbana aplicada a projetos e distritos de inovação Profa. Gabriela Celani (Universidade Estadual de Campinas, SP)			
10:00 h - 10:30 h	Perguntas e Discussão			
10:30 h - 11:00 h	Coffee Break			
	SALA 01	SALA 02	SALA 03	SALA 04
11:00 h - 12:30 h	Sessão Temática A - ENGENHARIA	Sessão Temática A - ARQUITETURA	Sessão Temática A - DESIGN	Minicurso Design 01 Design e Serviços
12:30 h - 14:00 h	Intervalo para almoço			
14:00 h - 16:00 h	Case - AGERA	Sessão Temática D - ARQUITETURA	Sessão Temática D - DESIGN	Minicurso Design 02 Sistema, Produtos e Serviços (SPS) Minicurso Engenharia 01 Desempenho e Sustentabilidade
16:00 h - 16:30 h	Coffee Break			
AUDITÓRIO				
16:30 h - 18:00 h	Mesa Redonda - Reabilitação de cidades e edificações Prof. Carlos Alberto Maciel (UFMG), Profa. Denise Duarte (USP) e Profa. Marília Fontenele (UFF)			

PROGRAMAÇÃO DIA 08/08

AUDITÓRIO				
8:00 h - 9:00 h	Credenciamento			
9:00 h - 10:00 h	Palestra - Fronteiras do conhecimento em design para a sustentabilidade Profa. Aguinaldo dos Santos (Universidade Federal do Paraná, UFPR)			
10:00 h - 10:30 h	Perguntas e Discussão			
10:30 h - 11:00 h	Lançamento Livro "Design para a sustentabilidade" - Grupo LENS			
10:30 h - 11:00 h	Coffee Break			
SALA 01	SALA 02	SALA 03	SALA 04	
11:00 h - 12:30 h	Sessão Temática B - ENGENHARIA	Sessão Temática B - ARQUITETURA	Sessão Temática B - DESIGN	Minicurso Engenharia Ensaio Não-Destrutivos
12:30 h - 14:00 h	Intervalo			
14:00 h - 16:00 h	Sessão Temática E - ARQUITETURA	Sessão Temática E - DESIGN	Sessão Temática F - DESIGN	Minicurso Engenharia Ensaio Não-Destrutivos
16:00 h - 16:30 h	Coffee Break			
AUDITÓRIO				
16:30 h - 18:00 h	Mesa Redonda - Design no antropoceno Profa. Raquel Noronha (UFMA), Profa. Karine Melo (PUC-RJ) e Prof. Carlo Franzato (PUC-RJ)			
19:30 h - 21:30h	Confraternização/ Coquetel - Escola de Design UEMG (por adesão)			

VISITA TÉCNICA: Wetlands Construídos - das 14h às 16h, dia 08/08.

PROGRAMAÇÃO DIA 09/08

AUDITÓRIO				
8:00 h - 9:00 h	Credenciamento			
9:00 h - 9:15 h	Abertura do ENSUS 2024 - AUDITÓRIO			
9:00 h - 10:00 h	Palestra - The earthen construction and the sustainability of buildings Prof. Christopher Beckett (University of Edinburgh, UK)			
10:00 h - 10:30 h	Perguntas e Discussão			
10:30 h - 11:00 h	Coffee Break			
SALA 01	SALA 02	SALA 03	SALA 04	
11:00 h - 12:30 h	Sessão Temática C - ENGENHARIA	Sessão Temática C - ARQUITETURA	Sessão Temática C - DESIGN	Minicurso Arquitetura - 01 Elaboração de Planos de Ação Climático Participativos
12:30 h - 14:00 h	Intervalo			
14:00 h - 16:00 h	Sessão Temática G - DESIGN	Sessão Temática F - ARQUITETURA	Case - ARES Arquitetura	Minicurso Arquitetura - 02 City Energy Analysis
16:00 h - 16:30 h	Coffee Break			
AUDITÓRIO				
16:30 h - 18:00 h	Mesa Redonda - Uso de resíduos na construção civil Profa. Carina Ulsen (USP), Prof. Ricardo Fiorotti (UFOP) e Prof. Augusto Bezerra (CEFET-MG)			
18:00 h - 18:15h	Encerramento do Evento			

EDITORIAL ENSUS 2024

MEMÓRIAS

Essa é a décima segunda edição do Encontro de Sustentabilidade em Projeto. Nascido em Santa Catarina, com barriguinha verde, em 2007, direto para o Brasil e para o mundo. As primeiras edições foram pequenas, em uma universidade particular. Depois, as edições posteriores migraram para a UFSC que, enquanto uma universidade pública de prestígio, proporcionou uma maior repercussão, colaborou na consolidação como o maior evento de sustentabilidade brasileiro e alcançou outros países, quer nas palestras, nos artigos ou mesmo com os revisores.

Suas edições anuais requerem fôlego da equipe organizadora e esse fato foi um impulso para tornar o evento itinerante. Atravessamos momentos difíceis, como a pandemia da COVID-19 e fomos, se não o primeiro, um dos primeiros eventos a ser realizado na modalidade online, em 2020, na primeira experiência itinerante pós UFSC. Continuamos o evento sem interrupções ou adiamentos e seguimos no nosso propósito, pois os dias têm nos mostrado a importância do conhecimento que compartilhamos durante todos esses anos. Esta primeira edição, em 2020, fora da UFSC aconteceu em uma universidade particular, aqui do ladinho, para nosso aprendizado e para enfrentar a mudança que veio repentina.

Após duas edições online, nosso maior desafio: levar o evento para uma universidade nova, pública, no outro lado do Brasil e na retomada da pandemia em 2022. Em função de todos esses determinantes, fizemos o evento híbrido, no Pará, na UNIFESSPA, com o tema da Amazônia Internacional, e foi um sucesso! Foi o ar fresco que precisávamos para retomar nossos rumos pós-pandemia.

Em 2023, encaramos não só organizar o ENSUS, mas também seu co-irmão, o SDS-Simpósio de Design Sustentável, na UFSC, presencialmente. Isso nos fortaleceu para chegarmos até Minas Gerais. Agora, além da barriguinha verde, e de já termos dançado o Carimbó, ganhamos aquele delicioso sotaque mineiro, com direito a pão de queijo e goiabada. E temos certeza que esse trem vai ser bom que nem ele só!!!

Foram enviados ao evento 208 artigos, oriundos de várias universidades brasileiras, públicas e privadas. Destes, serão publicados 155 artigos nos anais. Ao compararmos com o primeiro ENSUS, quando recebemos 27 artigos, ressalta-se a amplitude e a persistência de nosso alcance. Muitos dos autores da primeira edição continuam participando do evento até hoje. Contamos, ainda, com a colaboração de mais de 124 revisores para a emissão de pareceres duplo-cego.

A equipe que organiza o ENSUS tem por objetivo procurar fazer um evento sustentável, que rivalize em qualidade, alcance e importância científica com seus pares, sem que isso seja revertido em custos elevados ao participante. Para tal, várias ações são realizadas, uma das quais é fazermos o evento dentro da própria universidade, com equipe constituída apenas por professores, pesquisadores, bolsistas e voluntários das instituições participantes. O ENSUS não é um evento profissional, é um evento acadêmico que se constrói pelo esforço e pelo trabalho da coletividade sem qualquer fim lucrativo. Para nós da comissão organizadora, nossa simplicidade é motivo de orgulho privilegiando o estar presente e a troca de conhecimentos.

Hoje, na abertura deste evento, reforçamos a necessidade de que a sustentabilidade permaneça presente nas nossas discussões. Em 2023 e 2024 vimos o Brasil assolado por enchentes e um Rio Grande do Sul submerso, com uma população que ainda clama por ajuda frente às mudanças climáticas e percebemos a contribuição cada vez mais importante que as nossas pesquisas têm para oferecer.

Aos participantes do evento, gostaríamos de dar as boas-vindas do time de Minas Gerais, colocando-nos à disposição para o que se fizer necessário. Os anais do evento já estão disponíveis na página. Os melhores artigos estão sendo selecionados para as edições especiais das revistas Impact Projects, Mix Sustentável, Pensamentos em Design, Plural Design e Transverso e serão divulgados na Confraternização do evento.

Não poderíamos esquecer, antes de dar a largada para o início do evento, de agradecer às agências de fomento que viabilizaram a realização do ENSUS: a Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais - FAPEMIG (Edital 05/2023) e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (Edital 12/2023). Sem o apoio das agências de fomento não seria possível garantir valores de inscrição tão acessíveis. Agradecemos, ainda, à Fundação Christiano Ottoni, que nos auxiliou incondicionalmente nos processos de compra essenciais para a realização do ENSUS.

Aproveitem as três palestras, as três mesas redondas, os seis minicursos, os dois cases e as quinze sessões temáticas da nossa programação. Convido a todos a conhecerem os quatro expositores presentes no evento (PI Engenharia, Agera, Ares Arquitetura, Vila Sustentável da UFOP e Tecnologia Ligno) e perceberem que a sustentabilidade não é prerrogativa do ambiente acadêmico. Há empresas visionárias engajadas em novas tecnologias e projetos de extensão nas universidades, apoiados por empresas, que têm apostado na sustentabilidade como fator imprescindível para o desenvolvimento econômico e social de Minas Gerais e do Brasil.

Nosso muito obrigado a todos vocês que ajudam a construir este evento!

Sofia Araújo Lima Bessa (Representante da Comissão Organizadora - UFMG)
Lisiane Ilha Librelotto e Paulo Cesar Machado Ferroli (Comitê Científico - UFSC).



ENSUS

2024

ANAIS

PARTE 2 - ENGENHARIA

SUMÁRIO

Conexão Estratégica: Explorando as Relações entre Mobilidade Elétrica e Smart Grid para Transformar a Mobilidade Urbana	504
Victor Hugo Souza de Abreu, Márcio de Almeida D'Agosto, Lino Guimarães	
Adaptação de um container para uso como câmara climática em Belo Horizonte/MG	517
Raquel Diniz Oliveira, Isabella da Silva Filipe, Cristina Guimarães Cesar	
Explorando Metodologias de Análise de Risco Climático para a Infraestrutura de Transporte	527
Victor Hugo Souza de Abreu, Sandra Oda, Andrea Souza Santos	
Produção de argamassa ecológica de alto desempenho com adição de rejeito de minério de ferro	540
Abner Araujo Fajardo, Silvia Roberta Souza, Jordana Gonçalves de Macedo, Vinicius Ferreira Lanna, White José dos Santos	
Parceria Brasil-China: Avanços E Desafios Na Implementação De Corredores Verdes	550
Rafael Ferraz dos Santos, Victor Hugo Souza de Abreu	
Habitação de interesse social como modelo eficiente para Betim/MG	560
Bárbara Guimarães Gomes, Raquel Diniz Oliveira, Bruno Henrique Lourenço Camargos	
Tecnologias sustentáveis para recuperação de água e extração de ácido em efluentes de mineração de ouro: um enfoque em destilação por membranas e extração líquido-líquido para reúso	572
Lívia Maíra Carneiro Castro, Victor Rezende Moreira, Miriam Cristina Santos Amaral	
Perfil ambiental de edificações com os sistemas construtivos em alvenaria estrutural e em taipa de pilão	579
Bruna da Cunha Castilho, Augusto Montor de Freitas Luiz, Sarah Honorato Lopes da Silva Tamura	
Aplicação do Virtual Design and Construction - VDC: uma interface entre o BIM e AWP em edificações sustentáveis	589
Cristiane Bom Conselho Sales Alvarenga, Rosemary Bom Conselho Sales, Rodrigo Barreto Caldas, Maria Teresa Paulino Aguiar	
<i>Spatial and temporal variability of precipitation in a mountainous watershed using weighted interpolation by distance and elevation / Variabilidade espaço-temporal de precipitações em uma bacia hidrográfica montanhosa utilizando interpolação ponderada por distância e elevação</i>	602
David de Andrade Costa, Yared Bayissa, Rennan Mendes de Moraes dos Santos Dias, Dhiego Sales, Jader Lugon Junior, Antônio J.Silva Neto, Raghavan Srinivasan	
Avaliação experimental do impacto da utilização de agregados reciclados de resíduos da construção civil em matrizes cimentícias	611
Laura Viana de Melo, Thiago Ewerton Cobra de Castro, Paulo Henrique Vaz da Silva, Fernando do Couto Rosa Almeida	
Desenvolvimento e Calibração de Estação Climática de Baixo Custo	619
Clarissa Sartori Ziebell, Marcos Vizzotto, Pedro Henrique Gonçalves	
Avaliação de concretos produzidos com variadas areias de mineração – Em busca de dosagens de alto desempenho e sustentáveis	629
Cheila Barbosa de Souza, Mariana Menezes	
Análise do transporte de contaminantes agrícolas em corpos hídricos através da simulação de uma plantação de milho na plataforma MOHID Land em Varre-Sai, RJ	638
Laise Novellino Nunes de Souza, Wagner Rambaldi Telles, Jader Lugon Junior, Vicente de Paulo Santos de Oliveira	
Consequências dos fenômenos climáticos de 2023 sobre o Igarapé do Turuma-Açu em Manaus, Amazonas, Quanto ao Transporte Hidroviário	648
Ladson Danley Aguiar Vale, Jussara Socorro Cury Maciel	

Influência do uso da areia natural no índice de consistência e resistência à compressão de compósitos cimentícios produzidos com CP-V e CP-III	658
Vinicius Theiss Provatti, Juliana Jianhuan Li, Fernando do Couto Rosa Almeida, Thiago Ewerton Cobra de Castro	
Revisão Sistemática De Estudos Sobre A Sustentabilidade Do Processo De Impressão 3D	666
Tainá Stempkowski Terra, Jocelise Jacques de Jacques, Beatriz Martins Frasnelli, Fábio Gonçalves Teixeira	
Utilização Da Fibra De Cânhamo (Cannabis sativa L.) Como Matéria-Prima Na Construção Civil	675
Luanna Lourenço Morais, Fabíolla Xavier Rocha Ferreira Lima	
Horta em um centro de ensino fundamental: Sistema de irrigação por microgotejamento automatizado	685
Luca Demartini Gontijo, Guilherme Carvalho de Oliveira Martins, Dianne Magalhães Viana, Rafael Amaral Shayani	
Aplicação da abordagem ecossistêmica na Avaliação do Ciclo de Vida	695
Marina Silva Seabra da Rocha, Eleonora Sad de Assis	
Desenvolvimento de modelo para determinação da resistência à compressão axial do concreto a partir de ensaios não destrutivos: ultrassonografia e resistividade elétrica	705
Francisco Luiz Campos Lopes, Fernando do Couto Rosa Almeida, Laura Viana de Melo, Arthur Mader Portela Garcia Carvalho	
Requalificação Urbana: proposta de praça pública com regeneração de espaços verdes em Santana do Araguaia-PA	713
Cláudia Vasconcelos, Naielly Eudira Almeida dos Santos, José Armando Martins Ferreira, Luana dos Santos Costa de Sousa Lima, Wesley Dias Guedes	
Análise do gerenciamento de resíduos da construção civil: Um estudo de caso em Belém do Pará	722
Ádria Rafaella Modesto Reis, Samuel Oliveira de Queiroz, Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro, Mariana Domingues von Paumgarten	
O Ciclo de Vida de Sofá Estofado: inventário de sofá retrátil	731
Áurea Luiza Q. R Rapôso	
A Reciclagem De Resíduos Sólidos Na Construção Civil	744
Ana Beatriz Mascarenhas Pereira, Gisele Vidal Vimeiro, Samuel Rodrigues Castro, Bruno Henrique Lourenço Camargos, Roberto Galéry	
Revisão Sistemática sobre Avaliação dos Impactos das Hidrelétricas na Qualidade de Água da Bacia do Rio Itabapoana - Região Hidrográfica IX	753
Flávia Chrysóstomo Silva, Thiago Moreira de Rezende Araújo, Vicente de Paulo Santos de Oliveira	
Análise Dos Impactos Ambientais Causados Pelos Resíduos Sólidos de Construção e Demolição em Manaus – AM	764
Leilane Jovina Nascimento Braga, Brenda Carvalho Mar, José Costa Feitoza, Jussara Socorro Cury Maciel	
Utilização do Mapeamento Sistemático para a realização de uma revisão de literatura sobre métodos e tratamentos de água contaminada por rejeito de minério de ferro e petróleo utilizando floculação por taninos vegetais.	774
Fernanda Raggi Grossi, Neimar Freitas Duarte, Thiago Moreira de Rezende Araújo	
Estudo de Viabilidade Técnica de Solos para Paredes em Taipa de Pilão	784
Anderson Renato Vobornik Wolenski, Andreza Frare, José Eduardo Mendes de Lima, Emilia Teixeira Poltronieri, Thomas Camponogara Aires da Silva	
A estiagem de 2023 como evento hidrológico severo na bacia do Amazonas	796
Jussara Socorro Cury Luciana da Silva Loureiro, Renato Cruz Senna, Andre Luis Martinelli Real dos Santos	

Conexão Estratégica: Explorando as Relações entre Mobilidade Elétrica e *Smart Grid* para Transformar a Mobilidade Urbana

Strategic Connection: Exploring the Relationships between Electric Mobility and Smart Grid to Transform Urban Mobility

Victor Hugo Souza de Abreu, Doutor em Engenharia de Transportes, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia.

victor@pet.coppe.ufrj.br

Márcio de Almeida D'Agosto, Professor em Engenharia de Transportes, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia.

dagosto@pet.coppe.ufrj.br

Lino Guimarães Marujo, Professor em Engenharia de Produção, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia.

lino@pep.ufrj.br

Resumo

A implementação da mobilidade elétrica atrelada aos chamados *Smart Grids* constitui-se em uma importante estratégia para viabilização de um sistema inovador de baixa pegada de carbono com eficiência energética para promoção de cidades sustentáveis e inteligentes. Dessa forma, este artigo busca realizar uma revisão com abordagem bibliométrica sobre o assunto, bem como destacar suas principais vantagens da combinação desses dois conceitos para promoção da mobilidade urbana sustentável. Os resultados indicam que o assunto é atual e crescente, sendo publicados em importantes periódicos científicos por autores de instituições de diversas partes do mundo. Além disso, as análises bibliográficas demonstram que o *Smart Grid* tem potencial para promover a adoção multinível da mobilidade elétrica porque, por meio das novas tecnologias de comunicação e de informações implementadas, há a possibilidade de uma melhor interação entre os sistemas que compõem a infraestrutura de mobilidade urbana sustentável.

Palavras-chave: Mobilidade Elétrica Integrada; Infraestrutura Inteligente; Adoção Multinível.

Abstract

The implementation of electric mobility linked to the so-called Smart Grids is an important strategy to enable an innovative system of low carbon footprint with energy efficiency to promote sustainable and smart cities. Thus, this article seeks to conduct a review with a bibliometric approach on the subject, as well as to highlight the main advantages of combining these two concepts to promote sustainable urban mobility. The results indicate that the subject is current and growing, being published in important scientific journals by authors from institutions all over the world. Furthermore, the literature analysis demonstrates that the Smart Grid has the potential to promote the multilevel adoption of electric mobility because, through the new communication and information technologies implemented, there is the possibility of a better interaction between the systems that make up the sustainable urban mobility infrastructure.

Keywords: *Electric Mobility Integrated; Smart Infrastructure; Multi-Level Adoption.*

1. Introdução

Atualmente, muitos fabricantes de automóveis e outras partes interessadas têm investido recursos significativos no desenvolvimento e produção de veículos elétricos, tornando a mobilidade elétrica um dos principais assuntos em todas as mídias do mundo e uma grande influenciadora de discussões e decisões políticas [1–3]; no entanto, o desenvolvimento de uma rede de recarga eficiente é uma das questões-chave para permitir a difusão promissora dessa tecnologia, que pretende revolucionar a mobilidade urbana mundial [4]. Nesse sentido, torna-se necessário adaptar o sistema de potência para acomodar novas tecnologias e novos perfis de carga e, diante desse cenário, os *Smart Grids* são uma tendência promissora nas redes elétricas mundiais [5]. A mudança para uma sociedade com baixo teor de carbono exigirá avanços em áreas paralelas: a produção de energia renovável e a mobilidade elétrica exigem *Smart Grids* para atingir seu potencial [6].

Smart Grids, ou também chamadas “redes inteligentes”, buscam transformar a rede elétrica tradicional utilizando técnicas avançadas de controle e comunicação automática e outras formas de tecnologia da informação. O objetivo principal de um *Smart Grid* é entregar a quantidade ideal de informações e controle de carga para clientes, distribuidores e operadores da rede elétrica, a fim de reduzir as demandas e custos do sistema enquanto aumenta a eficiência energética [7]. Dessa forma, este estudo tem como objetivo realizar uma revisão da literatura com abordagem bibliométrica para identificar estudos que abordam sobre os benefícios da mobilidade elétrica, que viabiliza e é viabilizada por *Smart Grid*, por meio de buscas diretas na base de dados do *Web of Science*. Tem-se ainda como objetivos específicos: (i) apresentar a evolução das publicações e citações ao longo dos anos; (ii) identificar os principais periódicos e países que mais publicam estudos sobre o assunto; (iii) verificar as palavras-chave mais recorrentes, inclusive com rede de interligação entre elas; e (iv) realizar um apanhado geral sobre os benefícios da implantação das duas tecnologias concomitantemente.

Para cumprir seus objetivos, este estudo encontra-se estruturado da seguinte forma. A Seção 1 trata da contextualização, da importância e dos objetivos do estudo. A Seção 2 trata do procedimento metodológico utilizado para condução das buscas bibliográficas, com foco na bibliometria. A Seção 3 discute sobre as análises bibliométricas. A Seção 4 descreve alguns dos principais resultados das pesquisas incluídas no repositório de pesquisa, destacando as principais potencialidades da união entre mobilidade elétrica e *Smart Grid*. E por fim, a Seção 5 contém as considerações finais, que contêm recomendações de estudos futuros.

2. Procedimento Metodológico

Este estudo consiste em uma revisão da literatura com abordagem bibliométrica para mapeamento dos principais estudos que tratam do papel do *Smart Grid* na promoção da mobilidade elétrica e vice-versa. Uma crescente quantidade de estudos tem utilizado técnicas bibliométricas em várias disciplinas para rastrear o estado da arte de um campo e sua evolução ao longo do tempo. Nesse sentido, os termos de busca, critérios de inclusão e qualificação utilizados, bem como os detalhes para a busca e extração do banco de dados, são apresentados na Tabela 1, em que TS = Tópico, que significa as palavras que são pesquisadas nos títulos, resumos e palavras-chave dos artigos.

Tabela 1: Descrição das Estratégias de Buscas.

Critério	Descrição
Tópicos	$TS = (Smart\ Grid * AND\ e-mobility) OR TS = (Smart\ Grid * AND\ electric\ vehicle *) OR TS = (Smart\ Grid * AND\ electric\ mobility)$
Base de Dados	<i>Web of Science</i>
Indexes	SCI-EXPANDED, SSCI, A&HCI, CPCI-S, CPCI-SSH, ESCI
Inclusão	(I) Tempo de cobertura: todos os anos da base de dados (1945 – 2021); e (II) Enquadramento com o objetivo proposto.
Qualificação	(I) A pesquisa apresenta uma revisão bibliográfica bem fundamentada? (II) O estudo apresenta inovação técnica? (III) As contribuições são discutidas? (IV) As limitações são explicitamente declaradas? e (V) Os resultados e conclusões são consistentes com os objetivos pré-estabelecidos?
Data da Procura	09 de maio de 2021, as 19h00min

Optou-se por utilizar palavras-chave em inglês devido a maior quantidade de estudos relevantes em língua inglesa. Além disso, mesmo estudos publicados em outras línguas, tais como português, castelhano ou francês, apresentam, em sua maioria, pelo menos Resumo em inglês, ou seja, *Abstract*. Cabe destacar ainda que se combinou a palavra-chave *Smart Grid* com variações da mobilidade elétrica para aumentar ainda mais a abrangência amostral. Decidiu-se utilizar os bancos de dados do *Web of Science*, pertencentes ao *Clarivate Analytics*, como principal ferramenta de busca devido à sua difusão na comunidade acadêmica e à confiabilidade de seus padrões de seleção [8,9]. Além disso, essa base de dados apresenta alcance e cobertura satisfatórios [10].

Como limitação, menciona-se que o estudo utilizou apenas um banco de dados (*Web of Science*), não considerando publicações contidas em outras bases de dados como *Science Direct*, *Scielo* e *Scopus*. Além disso, é importante destacar que os termos de busca podem influenciar nos resultados, portanto, os artigos incluídos no repositório de pesquisa são limitados pelo banco de dados e os termos de busca utilizados.

3. Resultados Bibliométricos

A partir da busca realizada na base *Web of Science*, foi possível verificar que expressivas 2.806 publicações estavam aptas a serem incluídas no repositório de pesquisa, ou seja, atendiam aos critérios de inclusão e qualificação (qualidade e aplicabilidade). Nesse sentido, a Figura 1 mostra a evolução das publicações sobre o tema ao longo dos anos. Essa análise é fundamental para avaliar o nível de expansão da temática, bem como novas oportunidades de estudos. Na Figura 1, verifica-se que a primeira publicação foi registrada em 2008, com apenas 2 (0,07%) publicações, dado que demonstra que o assunto é extremamente atual. Além disso, o assunto continua em expansão, com ápice em 2018, com 352 (12,54%) publicações.

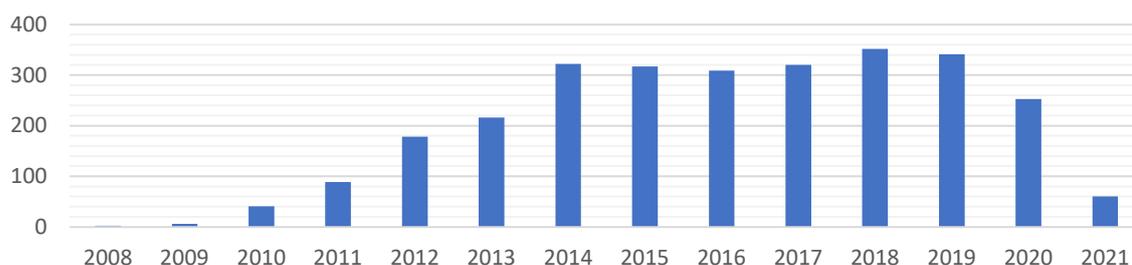


Figura 1: Evolução das publicações por ano.

Torna-se também pertinente avaliar os artigos por fonte de publicação, de modo a identificar quais são as revistas e congressos científicos que mais se interessam pelo assunto. Isso permite que pesquisadores direcionem seus esforços de publicação para meio de divulgação científica que possuem foco direto no assunto estudado, evitando perdas necessárias de tempo. Nesse sentido, a Figura 2 apresenta os periódicos com volume de publicações maior ou igual a que 36. Nela, nota-se que as fontes de publicação que mais abordam sobre o assunto são: IEEE - *Transactions On Smart Grid*, com 125 publicações, *Energies*, com 112 publicações, e IEEE - *Power And Energy Society General Meeting PESGM*, com 92 publicações. Salienta-se ainda que ao todo foi identificado que 1.352 fontes de publicação sobre o assunto, o que indica uma expressiva participação da temática no escopo de revistas e congressos relevantes.

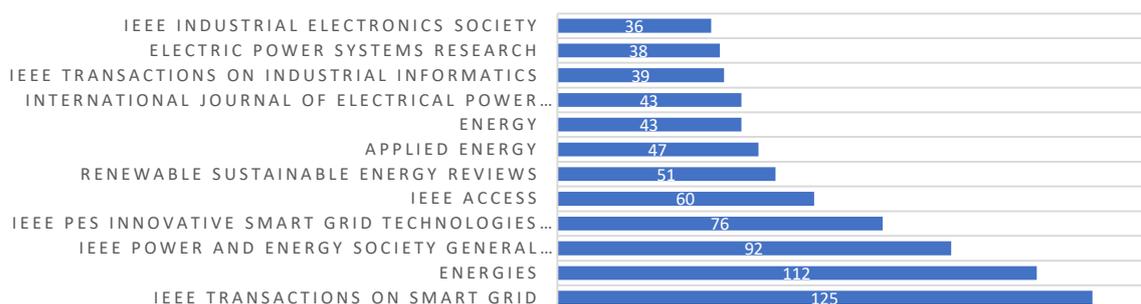


Figura 2: Principais fontes de publicação de estudos.

Também se considera pertinente avaliar quais são os países de origem das instituições de ensino dos autores que mais desenvolvem artigos relevantes sobre o assunto. Isso permite mostrar quais são os países que mais desenvolvem pesquisas sobre a temática investigada, bem como demonstrar carência de investimentos em outras nações. Dessa forma, os países com maior número de publicações se encontram identificados na Figura 3, desenvolvida com auxílio do *Software Tableau*.

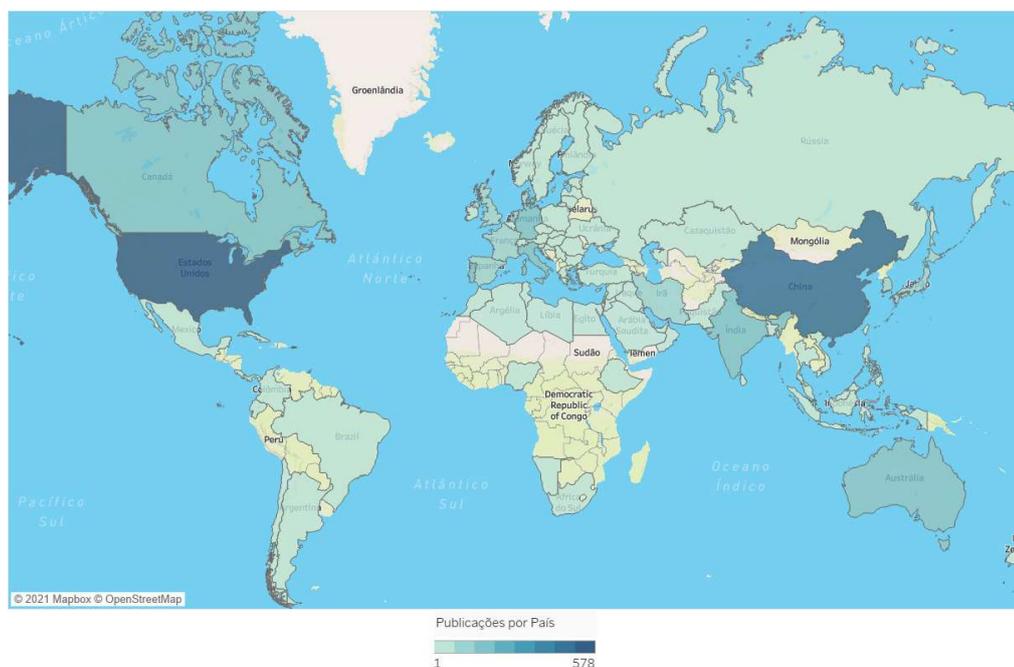


Figura 3: Principais países.

Por meio da Figura 3, nota-se que as publicações de concentram em sua grande maioria nos Estados Unidos da América, com 578 publicações, República Popular da China, com 467 publicações, e Canadá, com 217 publicações. Cabe ainda mencionar que outros 89 países têm pelo menos uma publicação sobre o assunto, como pode ser notado pela abrangência de publicações no mapa. Além disso, é pertinente destacar a participação brasileira, cada vez mais crescente, ocupando hoje a décima oitava posição no ranking com 51 estudos sobre a temática.

Acredita-se também interessante avaliar as principais palavras-chave encontradas nos artigos incluídos no repositório de pesquisa, conforme identificado na rede de interligação entre as palavras-chave apresentada na Figura 4, desenvolvida com auxílio do *Software VOSviewer*. Essa estratégia permite que pesquisadores encontrem mais facilmente estudos diretamente relacionados ao assunto investigado, bem como identifiquem novos rumos de pesquisa que podem ser tomados.

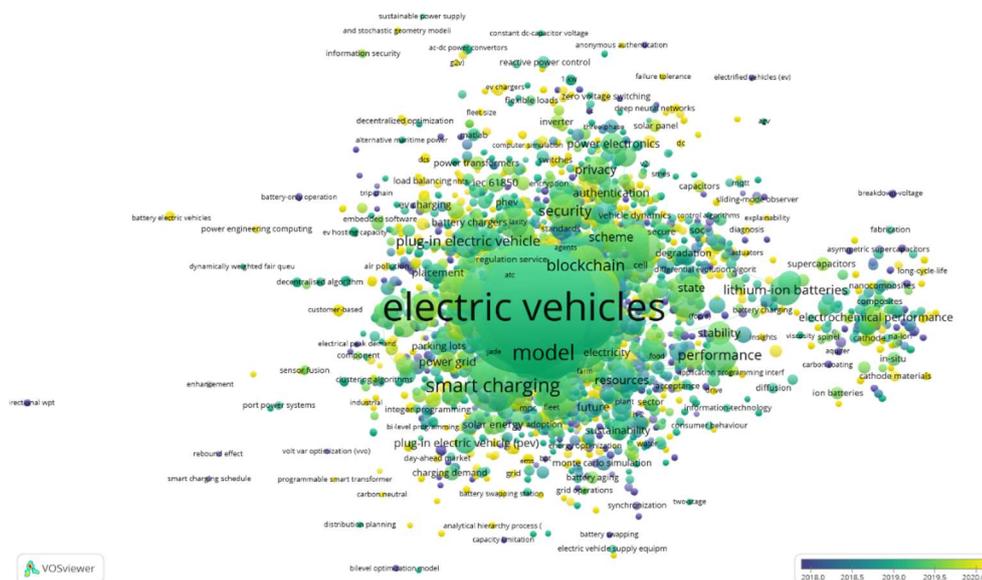


Figura 4: Principais palavras-chave.

Na rede representada na Figura 4, é possível identificar as palavras-chave mais utilizadas (de acordo com o tamanho da esfera sob sua representação), as interconexões entre elas (de acordo com as conexões entre esferas) e o período em que elas foram mais utilizadas (de acordo com a cor de cada esfera). Com a Figura 4, ainda é possível perceber as palavras-chave relacionadas a tecnologia implementada nos veículos como veículos elétricos plug-in (do inglês, *plug-in electric vehicles*), baterias de íon de lítio (do inglês, *lithium-ion batteries*) e eletrônica de potência (do inglês, *power electronics*), outras relacionadas ao carregamento elétrico como carregamento inteligente (do inglês, *smart charging*), agendamento de carregamento inteligente (do inglês, *smart charging schedule*) e pico de demanda por energia (do inglês, *electrical peak demand*), e ainda outras relacionadas à segurança da rede e do usuário como privacidade (do inglês, *privacy*), autenticação (do inglês, *authentication*) e protocolo de segurança (do inglês, *blockchain*).

Outra análise importante refere-se ao número de citações por ano, conforme apresentado na Figura 5. Essa análise, assim como a evolução das publicações ao longo dos anos, permite identificar o crescimento de interesse sobre o assunto ao longo dos anos. Com a Figura 5, observa-se que a primeira citação ocorreu no ano de 2010, dois anos após a primeira publicação, e que o número de citações cresceu com o passar dos anos, atingindo o ápice em 2020, com

expressivas 12050 citações. Esses dados mostram, mais uma vez, que o interesse pelo assunto continua em expansão.

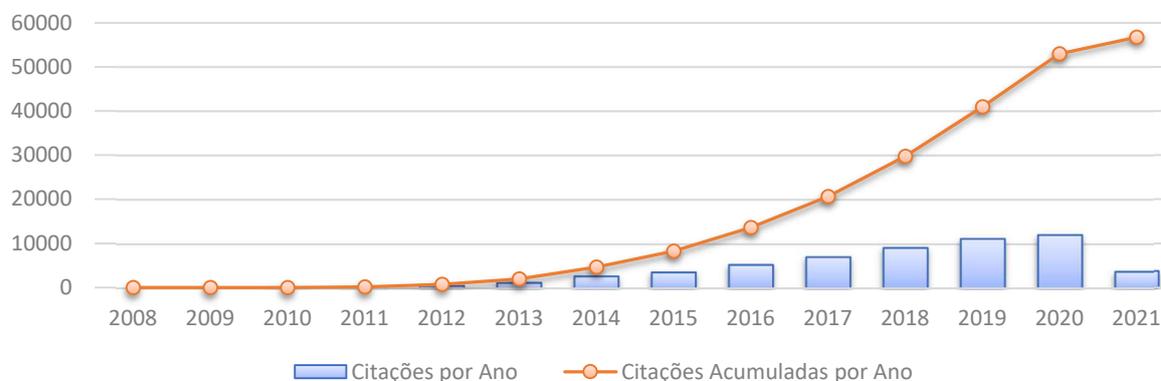


Figura 5: Evolução das citações por ano.

Ainda é possível determinar a dispersão das citações dos estudos mais relevantes da base de dados por meio da Figura 6. Nela, é possível identificar como as citações de cada um dos 10 estudos mais citados (TOP 10) se distribuem ao longo dos anos. Nesse sentido, nota-se que o estudo de Deilami *et al.* [11] é o mais expressivo da base de dados, com certa estabilidade de citações desde 2012 até os dias atuais, além disso, também pode-se destacar outras publicações como Tie & Tan [12] e Su *et al.* [13], que ocupam parte considerável do gráfico.

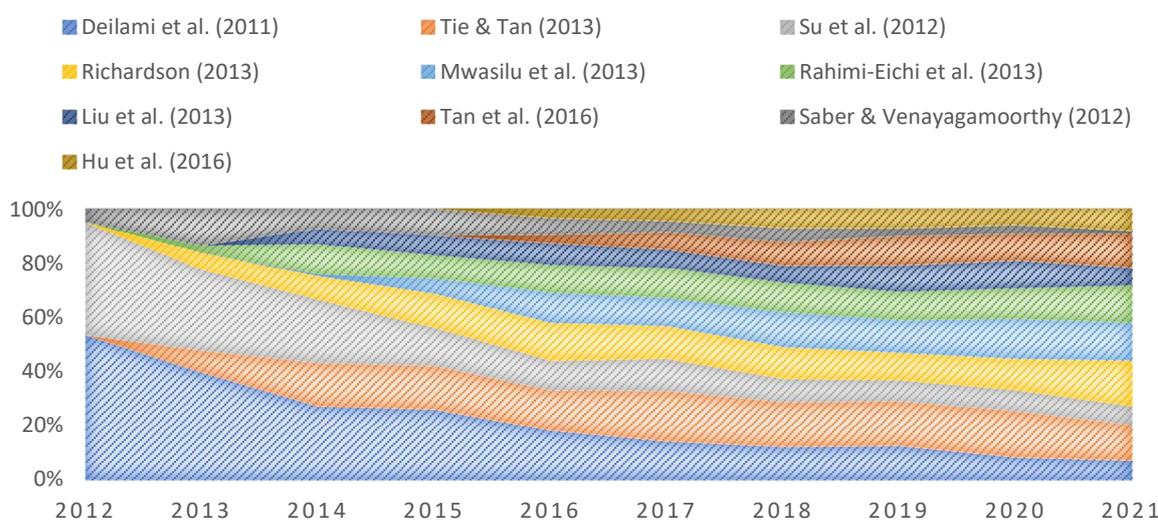


Figura 6: Distribuição das citações dos estudos mais relevantes por ano (TOP 10) [1,6,11–18].

4. Vantagens Decorrentes da Integração entre Mobilidade Elétrica e *Smart Grid*

As modernas infraestruturas de rede empregadas nos *Smart Grids*, podem desempenhar um papel fundamental na viabilização de serviços urbanos inovadores, sustentáveis e de fácil utilização por parte de todos os envolvidos no negócio, permitindo eficiência energética, sistemas de baixa pegada de carbono e uma cidade mais eficiente quanto ao uso [6], aspectos essenciais para o desenvolvimento de uma *Smart City*. *Smart Grid* é assim uma rede elétrica capaz de integrar ações de todas as partes interessadas (por exemplo, clientes, fornecedores, governo etc.) de forma a possibilitar a recarga de energia elétrica de forma sustentável [19].

Os *Smart Grids* são essenciais para integrar múltiplas formas de geração distribuída de energia elétrica de fonte renovável, diversificando a matriz energética, reduzindo as perdas na transmissão e melhorando a confiabilidade, segurança e eficiência do sistema de potência [14,20]. Essas características são alcançadas por meio de controles automatizados, infraestrutura de comunicação moderna e tecnologias de sensoriamento, monitoramento e gerenciamento de energia, que se relacionam com a Internet das Coisas – IoT¹ [21].

A disponibilidade irregular da maioria das fontes de energias renováveis exige o armazenamento de eletricidade, geralmente feito com baterias dedicadas. Com o auxílio de sistemas avançados de gerenciamento do sistema elétrico baseados em *Smart Grid*, as baterias podem ser empregadas no armazenamento de energia elétrica e auxiliar como “reserva de energia rotativa”, quando ocorrem os picos de demanda se, por exemplo, usando os recursos dos veículos elétricos que estiverem inativos [4]. De maneira complementar, para os fornecedores de energia elétrica, a eletrificação de veículos oferece uma forma de solucionar a demanda de pico, oferecendo um suporte à estabilidade da rede local, sem ter a necessidade de intervir em instalações de produção de energia distantes, reduzindo assim o peso na estrutura da rede nos horários de pico [6,22].

Além disso, quando os veículos elétricos forem progressivamente integrados em *Smart Grids*, grandes quantidades de dados e informações estarão disponíveis para todos os envolvidos com infraestrutura e sistemas de comunicação, fornecendo novas oportunidades para as empresas que atuam no setor automotivo, como por exemplo, influenciando a competitividade, as participações de mercado, os modelos de negócios e as estratégias de marketing dos atuais fabricantes de automóveis [4].

Segundo Curiale [19], os *Smart Grids* devem: (i) modernizar o sistema de energia por meio de projetos de autocura, automação, monitoramento e controle remotos; (ii) informar e educar os consumidores sobre o uso de energia, custos e opções alternativas, para capacitá-los a tomar decisões de forma autônoma sobre como e quando usar eletricidade e combustíveis; e (iii) fornecer integração segura e confiável de recursos de energia renovável e distribuída. Tudo isso se soma a uma infraestrutura de suprimento de energia mais confiável, sustentável e resiliente.

A visão dos *Smart Grids* combina a utilização da tecnologia tradicional com soluções digitais inovadoras que tornam mais flexível a gestão da rede de distribuição existente, por meio de uma troca de informações mais eficaz [16]. As redes de eletricidade são renovadas para melhor acomodar o fluxo de todas as fontes de energia, principalmente as renováveis, otimizam fluxos de eletricidade, possibilitam novos serviços como mobilidade elétrica e demanda ativa [19]. Nesse sentido, as conexões entre os veículos elétricos e o *Smart Grid* são ilustradas na Figura 7.

No esquema apresentado na Figura 7, desenvolvido por Dileep [23], o operador de rede (rotulado como ISO) recebe energia elétrica de seus fornecedores/geradores de energia elétrica (usinas eólicas, usinas solares, usinas hidrelétricas etc.) e transmite-a para a infraestrutura urbana (consumidores/clientes) por meio do *Smart Grid*. Essa transmissão de energia pode ser fornecida aos veículos elétricos, tanto em pontos de recargas individuais (residências, por exemplo), quanto em estacionamentos que apresentam estações de recarga coletiva. Cabe

¹ A Internet das Coisas conecta os objetos do mundo real com o virtual e, desta forma, permite a conectividade a qualquer hora e em qualquer lugar para qualquer coisa e não apenas para qualquer pessoa. Isto refere-se a um mundo onde objetos físicos e seres, bem como dados e ambientes virtuais, todos interagem uns com os outros no mesmo espaço e tempo (SUNDMAEKER et al., 2010).

mencionar que todos os tipos de veículos elétricos como bicicletas, patinetes, automóveis e ônibus podem ser carregados por meio dos *Smart Grids*.

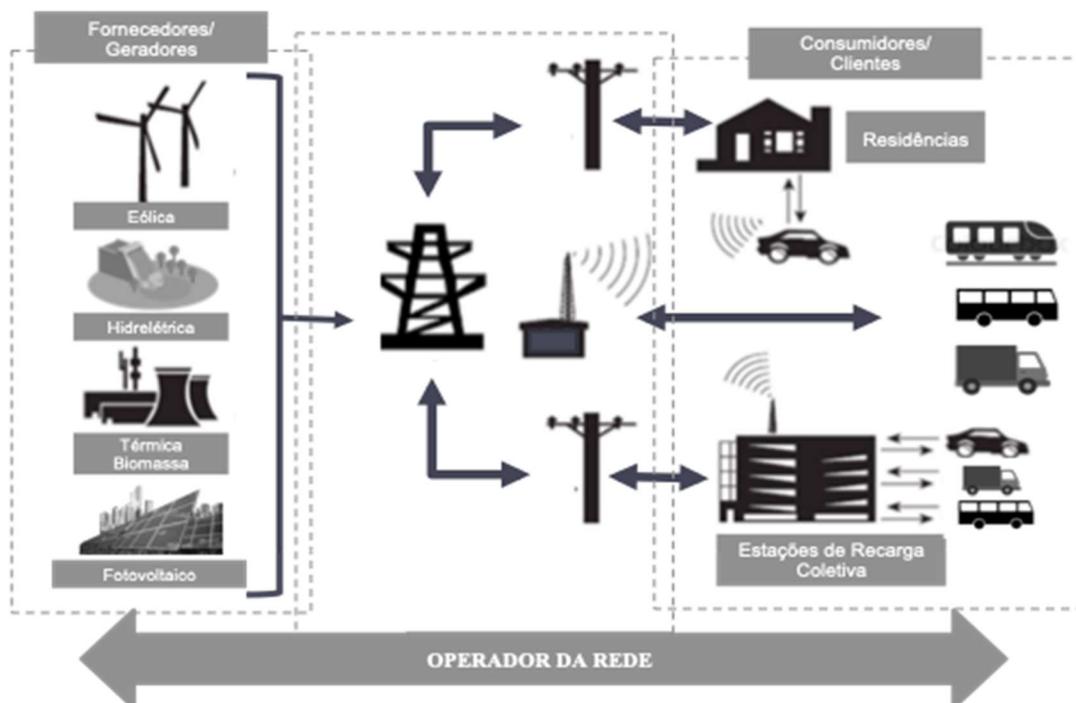


Figura 7: Estrutura de relacionamento entre *Smart Grid* e mobilidade elétrica.

Fonte: Adaptado de Dileep [23].

A infraestrutura para carregamento de veículos elétricos continua em expansão. Em 2019, havia cerca de 7,3 milhões de carregadores em todo o mundo, dos quais cerca de 6,5 milhões eram carregadores lentos para veículos leves particulares em residências unifamiliares, edifícios com várias residências e locais de trabalho, em função de benefícios como conveniência, economia e uma variedade de políticas de suporte (como taxas preferenciais, incentivos para compra de equipamentos e descontos) [24].

Além disso, os próprios veículos elétricos podem servir para o armazenamento e posterior fornecimento de energia elétrica (em um fluxo bidirecional), quando o sistema necessitar e enviar um sinal de controle [17]. Isso indica que há dois tipos possíveis de interações de energia entre o veículo e a rede elétrica: (i) G2V (do inglês, *Grid to Vehicle*), que consiste em uma rede elétrica que fornece energia ao veículo elétrico plug-in por meio de uma porta de carga; e (ii) V2G (do inglês, *Vehicle to Grid*), em que um veículo é capaz de fornecer energia de volta à rede elétrica, ou seja, armazena energia que é usada para compensar picos e vales no fornecimento e na demanda de eletricidade e, assim, ajudar a otimizar o gerenciamento da rede [15].

De acordo com Dileep [23], existem três versões principais do conceito V2G, todos envolvendo uma bateria a bordo, que são: (i) um veículo híbrido ou com pilha a combustível (conjunto de células a combustível); (ii) um veículo híbrido alimentado por bateria ou um veículo elétrico a bateria plug-in; ou (iii) um veículo solar. A tecnologia V2G pode ser empregada, transformando cada veículo com sua bateria de 20 a 50 kWh em um dispositivo de balanceamento de carga distribuída ou fonte de energia de emergência.

Além de fornecedores de energia elétrica, empresa detentora do serviço de *Smart Grid* e consumidores/clientes, outras Partes Interessadas também exercem influência no processo de relacionamento entre *Smart Grid* e mobilidade elétrica, tais como o governo, os órgãos reguladores, a sociedade em geral, a comunidade afetada, entre outros. A integração entre a mobilidade elétrica e a rede de distribuição de energia urbana em uma estrutura de *Smart Grid* pode favorecer a construção de um ecossistema de múltiplas partes interessadas e multi Internet (Internet da Informação², Internet da Energia³ e IoT) com recursos de computação de ponta suportados, por exemplo, por serviços em nível de nuvem e com mapeamento limpo entre as entidades lógicas e físicas envolvidas e suas partes interessadas [25,26].

Destaca-se ainda que o *Smart Grid* tem potencial para promover a adoção multinível da mobilidade elétrica porque, por meio das novas tecnologias de comunicação e de informações implementadas, há a possibilidade de uma melhor interação entre os sistemas que compõem a infraestrutura de mobilidade urbana, permitindo vários níveis de acesso às facilidades de transporte, que possibilitam que um mesmo usuário possa fazer uso de diferentes níveis de veículos elétricos (bicicletas, patinetes, scooters, automóveis, ônibus, etc.) de maneira integrada e inteligente em cidades de diferentes portes e perfis tecnológicos [26].

Uma *Smart City* que combina mobilidade elétrica multinível e *Smart Grids* pode ajudar a superar os limites e contradições do atual modelo de desenvolvimento urbano, caracterizado por uma má conexão entre os diferentes recursos disponíveis. No entanto, ela não deve ser vista apenas como uma lista de soluções, mas como uma abordagem holística plurianual, portanto, baseada tanto no planejamento de projetos e investimentos com um horizonte temporal de médio a longo prazo, quanto no envolvimento de múltiplas partes interessadas [27].

Por meio dessa adoção multinível da mobilidade elétrica, espera-se que o sistema de atendimento ao cliente como um todo melhore em nível de serviço (acessibilidade, tempo de viagem, conforto, segurança etc.) e com integração tarifária e redução de custo do serviço [26,28–30]. Num sistema de *Smart Grid* eficiente, aberto e em constante evolução, os clientes tornam-se protagonistas graças à utilização de suportes eletrônicos que tornam o consumo transparente, incentivam a participação ativa no mercado energético, melhoram o nível de serviço e promovem o uso consciente da energia [19].

Nesse sentido, de acordo com Dileep [23], o *Smart Grid* tem potencial para: (i) reduzir os preços da eletricidade pagos pelos consumidores; (ii) melhorar a acessibilidade aos serviços pelos consumidores; (iii) aumentar as oportunidades de escolha de oferta e informação transmitida ao consumidor; (iv) integrar recursos renováveis / não convencionais de energia distribuída; (v) melhorar a segurança, reduzindo as consequências e a probabilidade de desastres naturais e ataques feitos pelo homem; (vi) facilitar maior penetração de fontes alternadas de geração de energia; (vii) reduzir perda de vidas e ferimentos em eventos relacionados à rede elétrica, reduzindo assim os problemas de segurança; (viii) melhorar a eficiência geral, reduzindo perdas e desperdício de energia; e (ix) diminuir a poluição ambiental ao reduzir a emissão de gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos e fornecer energia mais limpa ao promover a implantação de recursos renováveis de energia distribuída.

² A Internet da Informação se tornou uma das principais bases de nossos sistemas socioeconômicos, permitindo a troca de informações. O objetivo principal da Internet da informação é mover informações de um local para outro para reduzir a disparidade de informações.

³ A Internet de Energia é um termo tecnológico que se refere à atualização e automatização de infraestruturas de eletricidade para produtores e fabricantes de energia. Isso permite que a produção de energia avance de forma mais eficiente e limpa, com o mínimo de desperdício.

Segundo o Department of Energy & Climate Change [31], à medida que o *Smart Grid* evolui, haverá papéis mais ativos para os clientes de diferentes perfis - por exemplo, os clientes domésticos com medidores inteligentes podem escolher tarifas e fazer uso de aparelhos inteligentes que mudam a demanda nos horários de pico (por exemplo, veículos elétricos podem ser abastecidos em horários com menor demanda por energia e, conseqüentemente, uma menor taxa pelo consumo de energia pode ser direcionada ao cliente); grandes clientes industriais e comerciais podem participar de uma ampla gama de esquemas de resposta à demanda e do mercado de capacidade e geradores de pequena escala podem participar de esquemas de resposta à demanda e do mercado de capacidade ajustando a exportação para uma rede.

Os *Smart Grids* são, assim, a chave para o sucesso de uma nova ideia de vida urbana: avançada, compartilhada e sustentável [15]. Num sistema de rede elétrica inteligente, aberto e em constante evolução, os clientes tornam-se protagonistas graças à utilização de suportes eletrônicos que tornam o consumo transparente, incentivam a participação ativa no mercado energético e promovem o uso consciente da energia [19]. Estas redes de eletricidade atualizadas com medição inteligente e capacidades de monitoramento, bem como uma comunicação digital bidirecional entre fornecedor e consumidor, apresentam capacidade de prever e responder de forma inteligente ao comportamento e ações de todos os usuários conectados a eles, resultando na entrega eficiente de dados confiáveis, econômicos, e serviços de suprimento de eletricidade sustentáveis [32].

Entretanto, cabe mencionar ainda que para que todos os benefícios mencionados anteriormente sejam atendidos, faz-se necessário aumentar o campo de aplicação das tecnologias por meio da conscientização dos consumidores, principalmente daqueles que não conseguem encontrar informações relevantes ou são expostos a informações confusas, indignas de confiança ou conflitante sobre a utilização de veículos elétricos, que reduzem as taxas de sua difusão e aceitação [33,34]. Isso porque as formas como os indivíduos percebem subjetivamente a inovação tecnológica e como estas podem ser integradas em suas vidas cotidianas moldam os processos de difusão [35].

Dessa forma, as soluções para mudar os hábitos de transporte e preferências dos usuários finais requerem uma abordagem integrada [36], especialmente na concepção de modelos para encorajar os usuários a fazer uma transição mais rápida para a mobilidade elétrica, estando ciente das restrições técnicas, econômicas e sociais ao criar esses modelos [37].

5. Considerações Finais

Este trabalho tem como objetivo coletar, reunir e avaliar os principais estudos sobre a implementação da mobilidade elétrica em paralelo ao desenvolvimento de *Smart Grids* por meio de revisão bibliográfica com abordagem bibliométrica. Os resultados bibliométricos mostram que o assunto continua em expansão com ápice de publicações em 2018 e de citações em 2020, dez anos após sua primeira publicação. Nota-se ainda que periódicos com elevado fator de impacto publicaram estudos sobre o assunto, inclusive alguns destes possuem foco nesta temática como o IEEE - *Transactions On Smart Grid*, que é o mais recorrente da base de dados.

Além disso, neste artigo, buscou-se destacar como os conceitos de mobilidade elétrica e *Smart Grid* se complementam e promovem o potencial tecnológico para o desenvolvimento de cidades sustentáveis e inteligente, com enfoque na qualidade do sistema e no protagonismo dos usuários, que inclusive podem se tornar fornecedores de eletricidade ao sistema. Frente a necessidade de novas pesquisas sobre o assunto, aconselha-se realizar mais estudos sobre a temática, que, principalmente no Brasil, ainda carece de pesquisa relacionada, por meio de

revisões bibliográficas (narrativas ou sistemáticas), inclusive com enfoque na segurança da rede e dos usuários, e de aplicação (estudo de caso de projetos de *Smart Grid* e mobilidade elétrica em fase de concepção).

Agradecimentos

Os autores deste estudo gostariam de expressar sua gratidão pelo generoso apoio fornecido pela Empresa NeoEnergia durante a execução do Projeto "Externalidades das redes elétricas inteligentes - Estudo de caso Atibaia, Sprint 2 - Mobilidade elétrica".

Referências

- [1] LIU, C.; CHAU, K.T.; WU, D.; GAO, S. Opportunities and Challenges of Vehicle-to-Home, Vehicle-to-Vehicle, and Vehicle-to-Grid Technologies. **Proceedings of the IEEE** **2013**, 101, 2409–2427, doi:10.1109/JPROC.2013.2271951.
- [2] MORTE, M. E-Mobility and Multiagent Systems in Smart Grid. In Proceedings of the 2016 **17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)**; IEEE, May 2016; pp. 1–4.
- [3] SANTOS, A.S.; DE ABREU, V.H.S.; DE ASSIS, T.F.; RIBEIRO, S.K.; RIBEIRO, G.M. An Overview on Costs of Shifting to Sustainable Road Transport: A Challenge for Cities Worldwide. In **Environmental Footprints and Eco-Design of Products and Processes**; Springer, 2021; pp. 93–121.
- [4] ALA, G.; DI FILIPPO, G.; VIOLA, F.; GIGLIA, G.; IMBURGIA, A.; ROMANO, P.; CASTIGLIA, V.; PELLITTERI, F.; SCHETTINO, G.; MICELI, R. Different Scenarios of Electric Mobility: Current Situation and Possible Future Developments of Fuel Cell Vehicles in Italy. **Sustainability** **2020**, 12, 564, doi:10.3390/su12020564.
- [5] DI SANTO, K.G.; KANASHIRO, E.; DI SANTO, S.G.; SAIDEL, M.A. A Review on Smart Grids and Experiences in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** **2015**, 52, 1072–1082, doi:10.1016/j.rser.2015.07.182.
- [6] HU, J.; MORAIS, H.; SOUSA, T.; LIND, M. Electric Vehicle Fleet Management in Smart Grids: A Review of Services, Optimization and Control Aspects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** **2016**, 56, 1207–1226, doi:10.1016/j.rser.2015.12.014.
- [7] CECATI, C.; MOKRYANI, G.; PICCOLO, A.; SIANO, P. An Overview on the Smart Grid Concept. In **Proceedings of the IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society**; IEEE, November 2010; pp. 3322–3327.
- [8] CAVIGGIOLI, F.; UGHETTO, E. A Bibliometric Analysis of the Research Dealing with the Impact of Additive Manufacturing on Industry, Business and Society. **Int J Prod Econ** **2019**, 208, 254–268.
- [9] AMEEN, W.; GHALEB, A.M.; ALATEFI, M.; ALKHALEFAH, H.; ALAHMARI, A. An Overview of Selective Laser Sintering and Melting Research Using Bibliometric Indicators. **Virtual Phys Prototyp** **2018**, 13, 282–291.
- [10] CHEN, X. The Declining Value of Subscription-Based Abstracting and Indexing Services in the New Knowledge Dissemination Era. **Serials Review** **2010**, 36, 79–85, doi:10.1080/00987913.2010.10765288.

- [11] DEILAMI, S.; MASOUM, A.S.; MOSES, P.S.; MASOUM, M.A.S. Real-Time Coordination of Plug-In Electric Vehicle Charging in Smart Grids to Minimize Power Losses and Improve Voltage Profile. **IEEE Trans Smart Grid** **2011**, 2, 456–467, doi:10.1109/TSG.2011.2159816.
- [12] TIE, S.F.; TAN, C.W. A Review of Energy Sources and Energy Management System in Electric Vehicles. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** **2013**, 20, 82–102, doi:10.1016/j.rser.2012.11.077.
- [13] SU, W.; EICHI, H.; ZENG, W.; CHOW, M.-Y. A Survey on the Electrification of Transportation in a Smart Grid Environment. **IEEE Trans Industr Inform** **2012**, 8, 1–10, doi:10.1109/TII.2011.2172454.
- [14] RICHARDSON, D.B. Electric Vehicles and the Electric Grid: A Review of Modeling Approaches, Impacts, and Renewable Energy Integration. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** **2013**, 19, 247–254, doi:10.1016/j.rser.2012.11.042.
- [15] MWASILU, F.; JUSTO, J.J.; KIM, E.-K.; DO, T.D.; JUNG, J.-W. Electric Vehicles and Smart Grid Interaction: A Review on Vehicle to Grid and Renewable Energy Sources Integration. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** **2014**, 34, 501–516, doi:10.1016/j.rser.2014.03.031.
- [16] RAHIMI-EICHI, H.; OJHA, U.; BARONTI, F.; CHOW, M.-Y. Battery Management System: An Overview of Its Application in the Smart Grid and Electric Vehicles. **IEEE Industrial Electronics Magazine** **2013**, 7, 4–16, doi:10.1109/MIE.2013.2250351.
- [17] TAN, K.M.; RAMACHANDARAMURTHY, V.K.; YONG, J.Y. Integration of Electric Vehicles in Smart Grid: A Review on Vehicle to Grid Technologies and Optimization Techniques. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** **2016**, 53, 720–732, doi:10.1016/j.rser.2015.09.012.
- [18] SABER, A.Y.; VENAYAGAMOORTHY, G.K. Resource Scheduling Under Uncertainty in a Smart Grid With Renewables and Plug-in Vehicles. **IEEE Syst J** **2012**, 6, 103–109, doi:10.1109/JSYST.2011.2163012.
- [19] CURIALE, M. From Smart Grids to Smart City. **In Proceedings of the 2014 Saudi Arabia Smart Grid Conference (SASG)**; IEEE, December 2014; pp. 1–9.
- [20] CARVALHO, M.; PEREZ, C.; GRANADOS, A. An Adaptive Multi-Agent-Based Approach to Smart Grids Control and Optimization. **Energy Systems** **2012**, 3, 61–76, doi:10.1007/s12667-012-0054-0.
- [21] GUNGOR, V.C.; SAHIN, D.; KOCAK, T.; ERGUT, S.; BUCCELLA, C.; CECATI, C.; HANCKE, G.P. Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards. **IEEE Trans Industr Inform** **2011**, 7, 529–539, doi:10.1109/TII.2011.2166794.
- [22] AZIZ, M.; ODA, T.; ITO, M. Battery-Assisted Charging System for Simultaneous Charging of Electric Vehicles. **Energy** **2016**, 100, 82–90, doi:10.1016/j.energy.2016.01.069.
- [23] DILEEP, G. A Survey on Smart Grid Technologies and Applications. **Renew Energy** **2020**, 146, 2589–2625, doi:10.1016/j.renene.2019.08.092.
- [24] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA **Global EV Outlook 2020**, IEA, Paris.; 2020;

- [25]D'ELIA, A.; VIOLA, F.; MONTORI, F.; DI FELICE, M.; BEDOGNI, L.; BONONI, L.; BORGHETTI, A.; AZZONI, P.; BELLAVISTA, P.; TARCHI, D.; et al. Impact of Interdisciplinary Research on Planning, Running, and Managing Electromobility as a Smart Grid Extension. **IEEE Access** **2015**, 3, 2281–2305, doi:10.1109/ACCESS.2015.2499118.
- [26]DE ABREU, V.H.S.; D'AGOSTO, M. DE A.; ANGELO, A.C.M.; MARUJO, L.G.; CARNEIRO, P.J.P. Action Plan Focused on Electric Mobility (APOEM): A Tool for Assessment of the Potential Environmental Benefits of Urban Mobility. **Sustainability** **2023**, 15, 10218, doi:10.3390/su151310218.
- [27]RUGGIERI, R.; RUGGERI, M.; VINCI, G.; POPONI, S. Electric Mobility in a Smart City: European Overview. **Energies (Basel)** **2021**, 14, 315, doi:10.3390/en14020315.
- [28]DE ASSIS, T.F.; MONTEIRO, T.G.M.; DE ABREU, V.H.S.; D'AGOSTO, M. DE A.; SANTOS, A.S. Enabling the Green Bonds Market for Sustainable Transport Projects Based on the Measure/Monitoring, **Reporting and Verification Method**. In; 2022; pp. 1–24.
- [29]DE ASSIS, T.F.; RICCI, L.M.; MONTEIRO, T.G.M.; DE ABREU, V.H.S.; D'AGOSTO, M. DE A.; SANTOS, A.S. Sustainable Transport Indicators and Mitigation Actions Applied to the Green Bond Principles. In; 2022; pp. 139–169.
- [30]DA COSTA, M.G.; DE ABREU, V.H.S.; DE ASSIS, T.F.; DA COSTA, V.X.; DE ALMEIDA D'AGOSTO, M.; SANTOS, A.S. Life Cycle Assessment and Circular Economy Strategies for Electric Vehicle: A Systematic Review on Mitigating Climate Change and Reducing Resource Depletion in Road Transportation. In **Environmental Footprints and Eco-Design of Products and Processes**; Springer, 2022; pp. 113–137.
- [31]Department Of Energy & Climate Change Smart Grid Vision and Routemap.; 2014;
- [32]European Commission E-Mobility and Smart Grids at the JRC. The European Commission's in-House Science Service.; 2011;
- [33]AUGENSTEIN, K. Analysing the Potential for Sustainable E-Mobility – The Case of Germany. **Environ Innov Soc Transit** **2015**, 14, 101–115, doi:10.1016/j.eist.2014.05.002.
- [34]BIRESSELIOGLU, M.E.; DEMIRBAG KAPLAN, M.; YILMAZ, B.K. Electric Mobility in Europe: A Comprehensive Review of Motivators and Barriers in Decision Making Processes. **Transp Res Part A Policy Pract** **2018**, 109, 1–13, doi:10.1016/j.tra.2018.01.017.
- [35]COSTA, E.; HORTA, A.; CORREIA, A.; SEIXAS, J.; COSTA, G.; SPERLING, D. Diffusion of Electric Vehicles in Brazil from the Stakeholders' Perspective. **Int J Sustain Transp** **2021**, 15, 865–878, doi:10.1080/15568318.2020.1827317.
- [36]KÜNLE, E.; MINKE, C. Macro-Environmental Comparative Analysis of e-Mobility Adoption Pathways in France, Germany and Norway. **Transp Policy (Oxf)** **2022**, 124, 160–174, doi:10.1016/j.tranpol.2020.08.019.
- [37]PAVIĆ, I.; PANDŽIĆ, H.; CAPUDER, T. Electric Vehicle Based Smart E-Mobility System – Definition and Comparison to the Existing Concept. **Appl Energy** **2020**, 272, 115153, doi:10.1016/j.apenergy.2020.115153.

Adaptação de container para uso como câmara climática em Belo Horizonte/MG

Container suitability for use as a climate chamber in Belo Horizonte/MG

Isabella da Silva Filipe, Engenheira de Produção Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG.

isabella.filipe@hotmail.com

Raquel Diniz Oliveira, Doutora e Professora Adjunta, CEFET-MG.

raqueldiniz@cefetmg.br

Cristina Guimarães Cesar, Doutora e Professora Titular, CEFET-MG.

cristinagcesar@gmail.com

Resumo

O reuso de *containers* para fins acadêmicos possibilita recriar o ambiente construído em escala real. Nesse contexto, investigou-se as estratégias aplicáveis para adaptar um *container* como câmara climática em Belo Horizonte - MG, com foco no seu desempenho térmico. Por meio de modelo termoenergético, aplicou-se os parâmetros normativos para adequar o *container* original para o novo uso. Os resultados da simulação indicaram a necessidade de adotar cor clara, isolamento térmico nas paredes (lã de vidro), além de cobertura verde. Caso a adaptação ocorra em etapas, seria possível compatibilizar os custos da aplicação dessas estratégias com a verba institucional.

Palavras-chave: Desempenho térmico; Simulação Termoenergética; Adequação climática; Custos.

Abstract

Containers reused for academic purposes can recreate the built environment on a real scale. Thus, the authors aim at adapting a container as a climate chamber in Belo Horizonte (Brazil) considering its thermal performance. Through a container thermoenergetic model the normative parameters were set to adapt it for this new use. The simulation results pointed out some changes such as light color and walls thermal insulation (glass wool) as well as a green roof. If this adaptation occurs in stages, it would be possible to make these strategies' costs suitable to the institutional budget.

Keywords: *Thermal performance; Thermoenergetic Simulation; Climatic suitability; Costs.*

1. Introdução

A recriação do ambiente construído para pesquisas experimentais se mostra como um obstáculo relevante. Além das questões de custo financeiro, inexistem, muitas vezes, laboratórios e/ou meios no cenário acadêmico que permitam investigar questões como o desempenho térmico de edificações, as condições de conforto dos ocupantes e/ou outros parâmetros relativos ao uso e operação do espaço, em dimensões próximas à escala real [1].

Adicionalmente, o acesso às edificações existentes para acompanhamento em pesquisas não se mostra simples ou viável, em muitos casos. Nesse contexto, a aplicação de câmaras

climáticas para pesquisas experimentais, possibilita a investigação de ambientes em escala real, além de possibilitar o controle de variáveis envolvidas no processo de simulação e/ou calibração de modelos termoenergéticos [1].

Todavia, o elevado custo dos aparatos tecnológicos de uma câmara climática pode inviabilizar o acesso a esse equipamento [1], em realidades com recursos financeiros limitados como ocorre, muitas vezes, nas universidades públicas. Desta forma, a adoção de técnicas que possibilite reduzir o seu custo se mostra relevante para a realidade brasileira.

A utilização de construções em *containers* como câmara climática se mostra uma opção para a redução de custos, sendo necessária uma maior investigação sobre o comportamento desses *containers* quando submetidos às variações de parâmetros climáticos [1]. Essa atenção maior ao comportamento dessas câmaras se deve ao fato de serem constituídas basicamente por chapas de aço, um material com alta condutibilidade térmica [2].

Conforme Rupp, Vásquez e Lamberts (2015), as câmaras climáticas são ambientes sobre os quais os pesquisadores possuem total controle das variáveis [3]. Complementando, Trevisan (2019) define as câmaras climáticas como volumes fechados que permitem a simulação de ambientes reais e possibilitam o controle de variáveis, tais como: a temperatura interna e a umidade do ar [4]. Ademais, essas câmaras podem ser montadas *in loco* ou pré-fabricadas, expostas às condições externas ou instaladas no interior de edificações.

O uso de câmaras climáticas como ambientes experimentais iniciou-se na década de 1960 na Dinamarca, tendo sido utilizada, posteriormente, em estudos de outras partes do mundo [5 e 6]. No Brasil, existem câmaras climáticas destinadas à experimentos [4]. Entretanto, não existem câmaras dedicadas a estudos relacionados a questões térmicas. Nesse contexto, as pesquisas desenvolvidas em Curitiba - PR [1, 4 e 7] representam uma inovação por propor a construção de uma Câmara Bioclimática de Baixo Custo (CBBC) utilizando *container*.

Trevisan (2019) defende ainda a construção de câmaras climáticas com o uso de *container* em dois módulos [4]. Dessa forma, seria possível realizar ensaios simultâneos em condições climáticas similares, por intermédio de pesquisas comparativas entre o módulo de controle (com características inalteradas) e o experimental (modificado). Além disto, trata-se de uma opção sustentável e de replicação internacional da câmara climática.

Os estudos nacionais sobre a avaliação do desempenho térmico de *containers* para adequação de câmaras climáticas ainda se mostram incipientes [1, 4 e 7]. No que tange às normativas acerca da adequação climática e construtiva tem-se em vigor apenas a NBR 15.575 [9], direcionada as habitações em geral ou a NBR15.220 [10 e 11], focada nas habitações de interesse social. Todavia, na ausência de um referencial mais específico diversos estudos aplicaram essas normativas para definição de estratégias construtivas para adequação de outros tipos construtivos, como *containers* [2, 4 e 8].

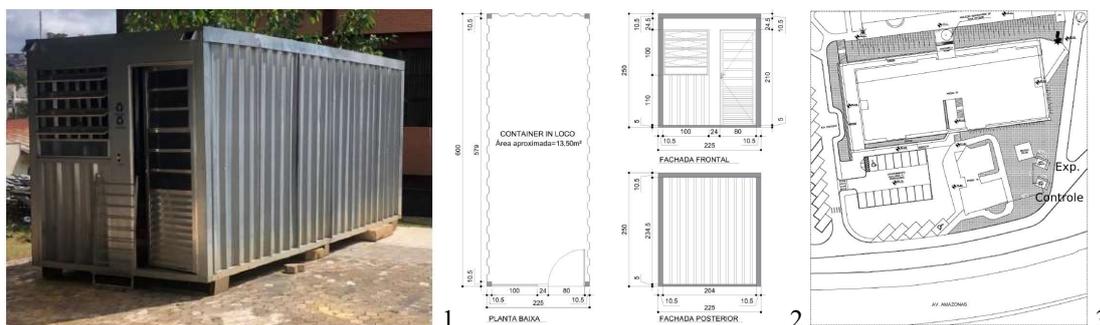
O presente estudo insere-se, portanto, neste cenário, com objetivo de investigar, por meio de simulação computacional, as estratégias para adequação do desempenho térmico aplicáveis a um *container* com destinação de uso em pesquisas, por meio da sua transformação em uma câmara climática. De forma complementar, verificou-se a compatibilidade financeira entre o custo e a verba disponível para a aplicação de estratégias necessárias para adequar um *container* existente, proporcionando uma análise econômica dos recursos fundamentais para a sua adequação e transformação em uma câmara climática.

2. Procedimentos Metodológicos

Para o presente estudo, realizou-se quatro etapas metodológicas, a saber: 1) Escolha e caracterização do objeto de estudo; 2) Criação do modelo termoenergético e simulação computacional; 3) Verificação de melhoria dos protótipos modificados; 4) Verificação de compatibilidade financeira. Os programas utilizados na etapa 2, atendem aos requisitos estabelecidos no método de simulação computacional da NBR 15.575 [9], além de serem amplamente utilizados pela literatura [1, 2, 4 e 7].

2.1. Seleção e caracterização do objeto de estudo

A seleção do estudo de caso se deu pela facilidade de acesso aos dados. Dessa forma, considerou-se um *container* existente (Figura 1 e 2), localizado em Belo Horizonte, dentro do *Campus Nova Gameleira* do CEFET-MG, situado na Zona Bioclimática (ZB) 3 [11], na latitude -19,85, longitude -43,95, altitude igual a 785m. Conforme se observa na Figura 3, considerou-se, hipoteticamente um novo posicionamento do *container*, ponderando a facilidade de acesso, a incidência de insolação (após estudo do entorno das 8h00 às 17h00 ao longo dos solstícios de verão e inverno), a direção predominante do vento na região (leste), bem como, a sua divisão em dois módulos (experimental, em vermelho e de controle, em azul), com 300cm de comprimento cada, afim de possibilitar, futuramente, a realização de ensaios simultâneos em pesquisas comparativas, conforme sugerido por Trevisan (2019) [4].



Figuras 1, 2 e 3: *Container* selecionado, suas dimensões e Implantação do módulo experimental e de controle. Fonte: elaborado pelos autores.

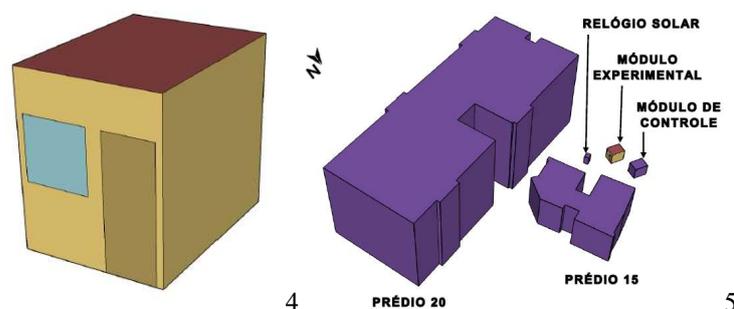
Quanto ao uso do espaço como ambiente laboratorial e, em função do tempo de ocupação, considerou-se os parâmetros municipais mínimos definidos para escritórios [12]. Desta forma, foi necessário considerar um pé-direito maior passando as dimensões do *container* para 225x300x275,5cm (largura x comprimento x altura), e área total de 6,75m², de modo a atender o pé-direito mínimo de 260cm. As suas demais características foram preservadas.

2.2. Criação do modelo termoenergético e simulação

A modelagem termoenergética do *container* foi elaborada com auxílio do *software SketchUp Make 2016*, em conjunto com a extensão *Euclid 0.9.3*. Para o modelo real, considerou-se as características construtivas do *container* original, enquanto para o modelo de referência, considerou-se as especificações estabelecidas na NBR 15575-1 [9], para a localidade em questão. Como dados de entrada, considerou-se o arquivo climático de Belo Horizonte-Pampulha do tipo *Solar and Wind Energy Resource Assessment - SWERA*, os

materiais construtivos referentes ao objeto de estudo, além das rotinas de uso e ocupação, as cargas térmicas referentes aos ocupantes, equipamentos e iluminação previstas na norma [9].

Nas Figuras 4 e 5 são mostradas, respectivamente, a geometria do *container* original, dos seus módulos divididos juntamente com o seu entorno imediato, com as diferenças de nível acrescidas na altura real dos prédios 15 e 20 e relógio solar existente.



Figuras 4 e 5: *Container* original, módulos e entorno. Fonte: Elaborado pelos autores.

Para a simulação computacional, utilizou-se o software *EnergyPlus*, em sua versão 8.7.0, bem como o método previsto em [9] para obter a média anual da temperatura externa de bulbo seco (TBSm) e as temperaturas operativas anuais da área de permanência prolongada (ToAPP), considerando o modelo real e de referência, naturalmente ventilado. Com base nesses dados, determinou-se o intervalo a ser considerado para o clima do local do estudo e, subsequentemente, a faixa de temperatura operativa a ser adotada. Isto possibilitou calcular o percentual de horas de ocupação do APP dentro da faixa de temperatura operativa (PHFT APP) e as temperaturas operativas anuais máximas e mínimas da UH (Tomax UH e Tomín UH), conforme estabelecido na NBR 15575-1 (2021). Desta forma, verificou-se o atendimento aos critérios normativos de desempenho térmico [9] do *container* original.

2.3. Verificação de melhorias dos protótipos modificados

Na hipótese do não atendimento dos limites da NBR 15.575 [9], considerou-se modificações no modelo. Essa etapa constitui-se, portanto, da modelagem termoenergética e simulação de protótipos virtuais desenvolvidos a partir das estratégias recomendadas pela NBR 15.220-3 [11] para a zona bioclimática do estudo (ZB3), com a finalidade de determinar aquela (s) mais efetiva (s) para melhorar o desempenho térmico do *container*.

Cumprir destacar que o condicionamento térmico passivo não foi considerado, uma vez que a implantação idealizada já contemplaria tal estratégia. Já as aberturas de ventilação foram mantidas inalteradas uma vez que Viana (2018) [2] observou que tal modificação não seria significativa para promover diminuição da temperatura interna em um *container* e, por consequência, o aperfeiçoamento do desempenho térmico. Assim, para o estudo das alternativas de adequação do desempenho térmico do *container* para obtenção do nível de desempenho térmico mínimo, propõem-se a criação e simulação computacional de protótipos virtuais (PVs) que levem em conta: a cor das fachadas (I: clara $\alpha = 0,3$; II: média $\alpha = 0,5$ ou III: escura $\alpha = 0,7$), inclusão de uma placa de gesso acartonado de 1,25cm na vedação vertical mais um isolante (IV: 3cm de lã de rocha; V: 3cm de lã de vidro; VI: 1,5cm de poliuretano expandido (EPS) ou VII: 3cm de câmara de ar) e inclusão de componente extra sobre a cobertura original do *container* em aço (VIII: telha sanduíche com EPS de 5,1cm ou IX: telhado verde: 5cm de grama, 15cm de terra argilosa, 3cm de argila expandida, 0,5cm de membrana betuminosa e 0,5cm de betume asfáltico), e X: agrupamento das opções com

maior $PHFT_{UH}$ em um único protótipo, conforme alternativas construtivas descritas em [2 e 11] e propriedades térmicas estabelecidas em [11].

Na sequência, verificou-se o atendimento ou não do desempenho térmico dos protótipos virtuais dos *containers* simulados contendo as estratégias investigadas, seguindo o mesmo procedimento descrito anterior. Nesse momento, os modelos que não atenderem ao desempenho térmico ao menos mínimo serão descartados, ao passo que os modelos que atenderem esse desempenho serão submetidos aos processos subsequentes. É importante ressaltar que, no cenário de nenhuma das simulações atenderem ao desempenho, a pesquisa é finalizada, concluindo que não é possível adequar o *container* original.

Assim, os resultados gerados pela simulação do *container* original e dos protótipos virtuais dos *containers* simulados contendo as estratégias investigadas são analisados com objetivo de determinar a estratégia isolada ou o conjunto de estratégias a serem empregada(s) para promover a melhoria desejada.

2.4. Verificação de compatibilidade financeira

Esta etapa que consiste no levantamento dos insumos necessários para a implementação da etapa anterior e, a consequente orçamentação via composições de serviços e materiais do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil – SINAPI para o mês de setembro de 2022 [13], de acordo com a composição não desonerada, tendo por referência a estratégia de menor custo de implementação definida.

Por fim, efetuou-se o estudo da compatibilidade financeira entre o custo da adaptação do *container* e a verba institucional disponível para tal. Para isso, levou-se em conta os recursos de custeio para apoiar o desenvolvimento das atividades acadêmicas e científicas de programas de pós-graduação fornecidos pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) via Programa de Apoio à Pós-Graduação (PROAP) [14], como a verba disponível para a realização da adaptação do *container*.

Esse estudo de compatibilidade financeira foi realizado a fim de que o produto proposto no presente trabalho possa ser explorado, futuramente, em modelo real, servindo para pesquisas acadêmicas dos diversos cursos do CEFET-MG, em diversas esferas do conhecimento (técnico, graduação e pós-graduação).

3. Resultados

3.1. Verificação do atendimento normativo e possíveis melhorias

Com base nos valores de saída da simulação para os critérios normativos [9], verificou-se que o *container*, em sua composição construtiva original, não atendeu ao nível de desempenho térmico mínimo (Tabela 1).

Tabela 1: Análise do desempenho térmico do *container* original.

Parâmetro	Critério	Modelo de referência	Modelo real	Valores do critério	Atendimento ao nível mínimo do modelo real
TBSm: 22,6°C / Faixa de TO: 18,0°C < T _{OAPP} < 26,0°C	PHFT _{UH} (%)	40,4	32,0	36,4	Não
	Tomáx _{UH} (°C)	37,2	38,0	38,2	Sim

Tomin _{UH} (°C)	13,0	9,8	12,0	Não
--------------------------	------	-----	------	-----

Fonte: Adaptado de NBR 15.575 (2021). Elaborado pelos autores.

Deste modo, após proceder com alterações de forma isolada, seguindo as recomendações aplicáveis indicadas por [2 e 11], verificou-se que a alteração apenas da cor da fachada, em suas três opções (clara, média ou escura) não foi suficiente para garantir o atendimento do desempenho térmico mínimo previsto na NBR 15.575 [9], conforme se observa na Tabela 2. Já o isolamento da vedação vertical (inclusão de placa de gesso + lã de rocha / vidro / EPS ou câmara de ar) em suas quatro opções, bem como as duas opções de alteração da cobertura (telha sanduíche ou telhado verde sob a cobertura original) possibilitaram alcançar apenas o critério de Tomá_{XUH}, que já havia sido atendido na condição original, conforme apresentado na Tabela 1. O atendimento do desempenho mínimo foi possível somente com a combinação das estratégias de I a IX, que possibilitaram os melhores resultados, incluindo as estratégias, I (cor clara), IV (lã de rocha) ou V (lã de vidro) e IX (telhado verde). Ambas as opções (IV e V), por terem propriedades térmicas similares propiciaram os mesmos resultados sendo indiferente, neste caso, a escolha de uma em detrimento a outra.

Tabela 2: Análise do desempenho térmico do container original Estratégias de I a IX.

Critério	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
PHFT _{UH} (%)	19,3	14,2	11,3	35,4	35,4	35,1	34,1	32,1	36,3	37,8
Tomá _{XUH} (°C)	40,3	41,8	43,0	36,7	36,7	36,8	37,0	37,7	37,2	36,1
Tomin _{UH} (°C)	10,3	10,1	9,9	10,7	10,7	10,6	10,5	10,4	11,0	12,8

Legenda: Os parâmetros atendidos foram destacados **em negrito**. Fonte: Elaborado pelos autores.

A alternativa combinada de estratégias para adequação do *container* original e atendimento do nível de desempenho térmico mínimo se mostrou, portanto, factível. Nesse contexto, os resultados obtidos no presente trabalho se mostraram coerentes com estudos similares [1, 4 e 7], tendo em vista a comprovação do potencial da adoção de estratégias de condicionamento passivo na aplicação de ventilação natural e na redução de temperaturas do *container* [2].

3.2. Verificação de compatibilidade financeira

O atendimento do desempenho térmico mínimo foi alcançado apenas com a estratégia denominada por X, que abrange a aplicação conjunta das seguintes alterações: adoção de cor clara nas fachadas; isolamento térmico das paredes (lã de rocha ou de vidro); inclusão de telhado verde sob a cobertura existente. Desse modo, considerou-se para o orçamento somente esse conjunto de alternativas que atenderiam os requisitos mínimos normativos [9].

No SINAPI verificou-se que existe apenas dados sobre lã de vidro, tornando necessário desconsiderar a aplicação de lã de rocha devido a inviabilidade do seu orçamento por meio dessa plataforma. Ademais, para contabilizar todos os custos para transformar o *container* em uma câmara climática, necessita-se orçar as despesas para dividi-lo em dois módulos (de controle e experimental) e, também, adequar o seu pé-direito à legislação vigente municipal [12]. Na Tabela 3 é apresentado o orçamento considerando os dados do mês de setembro de 2022, com uso da composição não desonerada do SINAPI [13].

Tabela 3: Orçamento para transformação de container em uma câmara climática.

Código da composição/ insumo	Descrição do item	Unidade	Preço Unitário (R\$)	QTD	Preço total (R\$)
100950	Guidauto hidráulico	H	280,03	8,00	2.240,24
99855	Serralheiro com encargos complementares	H	24,98	24,65	615,71
99855	Auxiliar de Serralheiro com encargos complementares	H	20,04	20,23	405,37
100766	Pilar metálico incluso mão de obra, transporte, içamento, fornecimento e instalação	Kg	14,94	1.042,80	15.579,43
11026	Chapa de aço galvanizada GSG 14, E=1,95mm	Kg	14,06	38,43	540,29
98746	Solda de topo em chapa de aço chanfrado, E=1/4"	M	72,37	19,32	1.398,19
94806	Porta em aço de abrir p/ vidro sem guarnição 87x210cm, incluso vidros	UN	647,33	1,00	647,33
94559	Janela de aço tipo basculante p/ vidros, c/ batente, ferragens e pintura anticorrosiva, incluso vidros, acabamento, alizar e contramarco	M ²	806,00	1,00	806,00
102161	Instalação de vidro liso incolor, E=3mm, em esquadria de alumínio	M ²	258,16	1,39	358,69
39744	Painel de lã de vidro sem revestimento PSI 40, E=25mm, de 1200x600mm	M ²	23,96	22,44	537,57
96370	Servente com encargos complementares	H	18,02	2,46	44,39
96371	Parede c/ placas de gesso acartonado (<i>drywall</i>) p/ uso interno	M ²	76,86	22,44	1.724,43
98557	Impermeabilização de superfície c/ emulsão asfáltica, 2 demãos	M ²	41,87	6,75	282,62
34549	Argila expandida granulometria 2215	M ³	1.119,88	0,20	226,78
7253	Terra Vegetal (granel)	M ³	222,85	1,01	225,64
103946	Gramma esmeralda ou São Carlos ou Curitiba em placas, sem plantio	M ²	12,75	6,75	86,06
98576	Impermeabilização c/ encargos complementares	H	25,14	0,18	4,58
103946	Servente c/ encargos complementares	H	18,02	1,06	19,02
103946	Jardineiro c/ encargos complementares	H	22,22	0,26	5,86
100753	Pintura c/ tinta acrílica de acabamento pulverizado sobre superfícies metálicas, 2 demãos	M ²	20,54	26,25	539,12
				Total:	26.287,32

Fonte: Adaptado de SINAPI (2022). Elaborado pelos autores.

Desta forma, considerando a disponibilidade de verba institucional que poderia ser destinada a este fim, apresentam-se os dados dos relatórios de gestão [14] dos últimos quatro anos exercício, 2018 a 2021, referente aos valores recebidos para o Programa de Apoio à Pós-Graduação (PROAP). Assim, conforme pode ser observado no Gráfico 1, nota-se uma

redução expressiva nos valores recebidos nos últimos anos. Ainda assim, ao considerarmos o menor valor já recebido, podemos observar que o valor orçado para transformar o *container* em uma câmara climática (R\$ 26.287,32) corresponderia a cerca de 58% do último recebimento. Assim, diante da dificuldade em se aprovar de imediato esse montante expressivo para adequação do *container*, sugere-se dividir a execução da sua transformação em etapas de modo a viabilizar tal modificação, sem prejudicar o auxílio para compra de insumo de pesquisas em andamento e/ou auxílio para participação em eventos.

Gráfico 1: Valores recebidos para o PROAP 2018-2021.



Fonte: Adaptado de CEFET-MG (2022). Elaborado pelos autores.

Adicionalmente, sugere-se a busca por editais de fomento à pesquisa de instituições a fim de obter financiamento para a transformação do *container*. Outra opção para viabilizar essa transformação seria por meio de parcerias com empresas fornecedoras de insumos (materiais, mão de obra e/ou equipamentos) e/ou provedoras de recursos financeiros para executar e/ou custear o processo de modificação do *container*.

4. Conclusão ou Considerações Finais

A avaliação de *container* existente para transformação em dois módulos (de controle e experimental a ser utilizado como câmara climática), por meio de simulação indicou como resultado o não atendimento aos critérios mínimos estabelecidos pela NBR 15.575-1. Desse modo, constatou-se ser necessário adotar estratégias para adequar o seu desempenho térmico. Assim, aplicando-se as estratégias de condicionamento passivo indicadas pela NBR 15.220-3 para a ZB3, identificou-se como alternativas: alterar a cor das fachadas, adotar diferentes isolamentos térmicos nas paredes e modificar a cobertura. Contudo, a aplicação destas estratégias de forma isolada se mostrou ineficiente para propiciar o atendimento aos critérios de mínimos normativos.

Por outro lado, a adoção conjunta das estratégias que propiciaram maior PHFTUH (cor clara nas fachadas; isolamento térmico da vedação vertical com lã de rocha ou de vidro e inclusão de telhado verde sobre a cobertura existente), possibilitou o atendimento das condições mínimas.

Quanto ao custo, a adoção desse conjunto de estratégias de transformação do *container* em câmara climática, se mostrou exequível, considerando a limitação da verba de pesquisa do PROAP, desde que a execução seja dividida em etapas. O custo dessa transformação (R\$ 26.287,32) corresponde a cerca de 58% do menor valor já recebido nos últimos quatro anos exercício, 2018 a 2021. Espera-se que este trabalho possa contribuir para ampliar as possibilidades de experimentos e pesquisas *in situ*, direcionadas ao ambiente construído.

Referências

- [1] TREVISAN, L. Y. I.; SHIBATA, R.; CELLIGOI, G.; RIBEIRO, R. S.; AMARILLA, R. S. D. KRÜGER, E. L. Avaliação Pós-Ocupação de uma Câmara Bioclimática de Baixo Custo: a percepção térmica e acústica no diagnóstico de um ambiente construído. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 2, p. 285-303, abr./jun. 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212020000200400>.
- [2] VIANA, F. S. **Análise de desempenho térmico em módulo de contêiner marítimo** (Dissertação). 2018. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.
- [3] RUPP, R. F.; VÁSQUEZ, N. G.; LAMBERTS, R. A review of human thermal comfort in the built environment. **Energy and Buildings**, v. 105, 2015, p. 178-205. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.047>.
- [4] TREVISAN, L. Y. I. **Concepção, construção e verificação da aplicabilidade de uma câmara bioclimática de baixo custo em estudos de conforto ambiental** (Tese). 2019. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.
- [5] PISELLO, A. L.; PIGLIAUTILE, I.; ANDARGIE, M.; BERGER, C.; et al. Test rooms to study human comfort in buildings: A review of controlled experiments and facilities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 149, 2021, p. 111359. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111359>.
- [6] KIM, J., DE DEAR, R., PPARKINSON, T., CANDIDO, C., COOPER, P., MA, Z., SAMAN, W. Field study of air conditioning and thermal comfort in residential buildings. In: 9th Windsor Conference: Making Comfort Relevant. **Proceedings...** Windsor: Windsor Conference, 2016.
- [7] RIBEIRO, D. A. **Recomendações para a replicação de câmara bioclimática de baixo custo nas zonas bioclimáticas brasileiras** (Dissertação). 2019. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.
- [8] CAMPANHARO, M.; ROSSI, F. Análise do conforto térmico de contêiner em Curitiba/PR. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO 17, 2018, Foz do Iguaçu. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2018, p. 603-612.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15575-1/Emenda 1:2021**. Edificações habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro, 2021, 48p.
- [10] ABNT. **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações. Parte 2 – Componentes e elementos construtivos das edificações — Resistência e transmitância térmica - Métodos de cálculo (ISO 6946:2017 MOD). Rio de Janeiro, 2022, 47p.
- [11] ABNT. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e estratégias de condicionamento térmico passivo para Habitações de Interesse Social. Rio de Janeiro, 2005, 30p.

[12] PREFEITURA DE BELO HORIZONTE - PBH. **Lei nº 9725, de 15 de julho de 2009.** Disponível: <https://leismunicipais.com.br/codigo-de-obras-belo-horizonte-mg>. Acesso: 11 set. 2022.

[13] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **SINAPI** - Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil. Disponível: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/precos-e-custos/9270-sistema-nacional-de-pesquisa-de-custos-e-indices-da-construcao-civil.html?=&t=o-que-e>. Acesso: 07 set. 2022.

[14] CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS - CEFET MG. **Relatórios de Gestão.** Disponível: <https://www.cefetmg.br/instituicao/relatorios-de-gestao/>. Acesso: 10 nov. 2022.

Explorando Metodologias de Análise de Risco Climático para a Infraestrutura de Transporte

Exploring Climate Risk Analysis Methodologies for Transportation Infrastructure

Victor Hugo Souza de Abreu, Doutor em Engenharia de Transportes, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia.

victor@pet.coppe.ufrj.br

Sandra Oda, Professora em Engenharia de Transportes, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia.

sandraoda@poli.ufrj.br

Andrea Souza Santos, Professora em Engenharia de Transportes, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia.

andrea.santos@pet.coppe.ufrj.br

Resumo

A mudança climática apresenta diversos desafios para o setor de transporte devido à sua alta vulnerabilidade às condições climáticas e meteorológicas, assim como aos impactos decorrentes de eventos climáticos extremos. Esses eventos têm influência direta na vida útil da infraestrutura e na segurança do transporte. Isso ressalta a necessidade de incorporar considerações sobre mudança climática em projetos regulares de infraestrutura de transporte, destacando a importância de realizar uma Análise de Risco Climático (ARC) abrangente. Este estudo tem como objetivo examinar diversas metodologias fundamentais de ARC no setor de transportes, enfatizando suas vantagens proeminentes e identificando desafios significativos. Além disso, destaca-se a importância de uma abordagem integrada, evidenciando a convergência dessas metodologias. Isso proporciona uma visão abrangente dos elementos essenciais a serem considerados em uma ARC, ressaltando a necessidade de uma abordagem holística para lidar com os impactos da mudança climática no setor de transporte.

Palavras-chave: Mudança Climática; Infraestrutura Rodoviária; Análise de Risco Climático.

Abstract

Climate change poses several challenges for the transportation sector due to its high vulnerability to climate and weather conditions, as well as the impacts of extreme weather events. These events have a direct influence on the useful life of infrastructure and transportation safety. This underscores the need to incorporate climate change considerations into regular transportation infrastructure projects, highlighting the importance of conducting a comprehensive Climate Risk Analysis (CRA). This study aims to examine several key CRA methodologies in the transport sector, emphasizing their prominent advantages and identifying significant challenges. In addition, it highlights the importance of an integrated approach, highlighting the convergence of these methodologies. This provides a comprehensive overview of the essential elements to be considered in a CRA, highlighting the need for a holistic approach to dealing with the impacts of climate change in the transport sector.

Keywords: *Climate Change; Road Infrastructure; Climate Risk Analysis.*

1. Introdução

Os sistemas de transporte e sua infraestrutura foram em grande parte projetados e operados para condições climáticas históricas, com alguma margem de segurança, que agora são frequentemente ultrapassadas em virtude de eventos extremos fora da faixa "típica" acarretados pela mudança climática [1,2]. A vida útil projetada de uma ponte pode variar de 50 a 100 anos, enquanto a de uma rodovia pode variar de 20 a 30 anos, portanto é imperativo considerar eventos climáticos futuros e como esses eventos afetarão os investimentos e a capacidade de manutenção dos componentes da infraestrutura [3]. Isto indica que a infraestrutura não só precisa ser confiável quando submetida a uma carga padrão, mas também ser capaz de minimizar a magnitude e a duração das falhas sob condições excepcionais [4].

A mudança climática acarreta vários desafios para o setor de transporte porque este sistema é altamente vulnerável às condições climáticas e meteorológicas [5], e aos seus impactos devido à ocorrência de eventos climáticos extremos, que influenciam a vida útil da infraestrutura e a segurança do transporte [6]. Isto enfatiza a necessidade de considerar a mudança climática em projetos regulares de infraestrutura de transporte, incluindo toda a vida útil destes ativos [7]. Entretanto, as agências de transporte têm recursos financeiros limitados para a manutenção de rodovias e enfrentam demandas por infraestrutura sustentável [8]. O risco climático de uma infraestrutura de transporte depende de uma variedade de fatores, incluindo sua natureza, localização, características de projeto e práticas de construção [1]. Dessa forma, ressalta a complexidade das interações entre os diversos fatores de risco da mudança climática e de como os diversos riscos se agravam ou se multiplicam [9].

Surge então a questão de como as autoridades rodoviárias devem proceder para integrar a variável climática na gestão dos ativos usuais [10,11]. Dessa forma, torna-se necessário que os tomadores de decisão de transportes (incluindo, engenheiros rodoviários, gerentes de ativos, profissionais de adaptação à mudança climática, gerentes de inovação e gerentes de projeto) realizem uma aprofundada Análise de Risco Climático (ARC) [12,13]. Segundo o IPCC [14], as ARC devem considerar três componentes: ameaça climática, exposição e vulnerabilidade (sensibilidade e capacidade adaptativa). Esta análise deve considerar ferramentas para apoiar os tomadores de decisão usando dados observacionais e/ou experimentais e modelos de simulação de cenários para quantificar os impactos de eventos extremos e mudança climática incremental e identificar pontos quentes na rede rodoviária em qualquer localização geográfica do mundo [15].

Este estudo visa examinar diversas metodologias fundamentais de ARC no setor de transportes, enfatizando suas vantagens proeminentes e identificando desafios significativos. Além disso, destaca-se uma atenção especial à convergência dessas metodologias, proporcionando uma visão abrangente dos elementos essenciais a serem considerados em uma ARC.

2. Metodologia

Este estudo adota uma abordagem dividida em 4 etapas para examinar as metodologias fundamentais de ARC no setor de transportes, destacando vantagens proeminentes e identificando desafios significativos. A metodologia será delineada de acordo com as etapas apresentadas na Figura 1.



Figura 1. Metodologia científica.

Fonte: elaborado pelos autores.

3. Análise de Risco Climático

Os riscos climáticos afetam diretamente os ativos físicos de infraestrutura e impactam de forma significativa a economia do país [16,17], logo, qualificar e quantificar os riscos relacionados ao clima proporciona maior margem de manobra para reduzir os desastres e prejuízos em âmbito nacional [18]. Segundo exposto pelo IPCC [14], a ARC deve envolver a ameaça climática, a exposição e a vulnerabilidade (dada em função da sensibilidade e capacidade adaptativa) das infraestruturas, conforme exposto na Figura 2.



Figura 2. Modelo conceitual para análise do risco de impacto da mudança climática.

Fonte: Adaptado de IPCC (2014a).

Pela Figura 2, nota-se que o risco de impacto é o resultado emergente da interação entre suas três dimensões/componentes, que podem ser entendidas, conforme exposto pelo ADAPTABRASIL MCTI [19]:

- Ameaça: é o processo externo climático (tais como estiagem, precipitações intensas e ondas de calor) que interage com o ambiente de análise e que possuem capacidade de transformação significativa no sistema, seja ela lenta ou repentina;
- Exposição: é o grau, duração e/ou extensão a que o sistema está sujeito no contato com a ameaça climática, sendo uma propriedade relacional entre o ambiente de análise e a ameaça;
- Vulnerabilidade: é a suscetibilidade a danos potenciais para uma mudança ou uma transformação do ambiente de análise, quando confrontados com uma ameaça, e não como o resultado desse confronto. Além disso, é estabelecida em função da sensibilidade e da capacidade adaptativa, que podem ser descritas como:
 - Sensibilidade: é o grau em que o sistema em análise é afetado, adversamente ou benéficamente, por estímulos relacionados ao clima, de forma direta ou indireta; e
 - Capacidade adaptativa: é a habilidade do sistema de se ajustar a um distúrbio ou danos potenciais, aproveitando as oportunidades e lidando com as consequências de uma transformação que ocorra.

A ARC desempenha um papel crucial no setor de transportes, oferecendo benefícios significativos em face da mudança climática, conforme destacado na Tabela 1.

Tabela 1. Benefícios da realização de ARC no setor de transportes.

Benefício	Descrição
Resiliência da Infraestrutura	A ARC permite avaliar e fortalecer a resiliência da infraestrutura de transporte contra eventos climáticos extremos, como enchentes, tempestades e elevação do nível do mar. Isso é essencial para garantir a continuidade operacional e reduzir danos materiais.

Benefício	Descrição
Tomada de Decisões Informada	A compreensão dos riscos climáticos ajuda na tomada de decisões informada. Planejadores e gestores podem adotar medidas preventivas e estratégias de adaptação, minimizando os impactos adversos nos serviços de transporte.
Planejamento a Longo Prazo	A ARC permite um planejamento mais eficaz a longo prazo, considerando os cenários climáticos futuros. Isso é fundamental para garantir que as decisões de investimento e expansão da infraestrutura estejam alinhadas com as projeções climáticas.
Proteção dos Usuários	A ARC contribui para a segurança dos usuários, considerando potenciais ameaças climáticas. Isso é especialmente relevante para evitar acidentes e garantir a segurança nas rodovias, ferrovias, portos e aeroportos.
Redução de Custos de Manutenção	Ao identificar áreas propensas a desgastes acelerados devido a condições climáticas adversas, a ARC possibilita estratégias proativas de manutenção, reduzindo custos operacionais a longo prazo.
Atendimento a Requisitos Regulatórios	Com o aumento da conscientização ambiental e das regulamentações relacionadas à mudança climática, a ARC auxilia o setor de transportes a cumprir requisitos legais e normativos, promovendo práticas mais sustentáveis.

Fonte: Baseado em de Abreu [20].

Conforme evidenciado na Tabela 1, a incorporação da ARC não apenas fortalece a resiliência do setor de transportes, mas também emerge como um componente essencial para impulsionar a eficiência operacional e mitigar desafios prementes. Além disso, ao promover práticas sustentáveis, a ARC contribui significativamente para a redução da pegada ambiental, alinhando-se de maneira inovadora com os objetivos de sustentabilidade global. Essa abordagem não só atende às demandas atuais do setor, mas também oferece uma base sólida para a segurança contínua dos sistemas de transporte, promovendo um ecossistema resiliente e eficaz.

4. Metodologias de Análise de Risco Climático referentes ao setor de transportes

Uma análise abrangente das metodologias de ARC implementadas globalmente no setor de transportes serve para destacar tanto seus aspectos positivos quanto às limitações a serem superadas e assim alcançar uma ARC mais alinhada com a realidade [21,22]. Nesse contexto, a Tabela 2 oferece um resumo das principais metodologias desenvolvidas para a adaptação, concentrando-se explicitamente na infraestrutura de transporte.

As construções elaboradas foram principalmente direcionadas para fortalecer a infraestrutura física, ativos, operação, manutenção e gestão organizacional. Este método de adaptação, de forma geral, busca avaliar os impactos e vulnerabilidades da infraestrutura física e dos ativos já existentes. Além disso, procura identificar e implementar medidas para reduzir ou mitigar as vulnerabilidades decorrentes da mudança climática, levando em conta a sensibilidade e capacidade adaptativa, conforme mencionado anteriormente.

Nesse contexto, é essencial ressaltar a importância de uma abordagem proativa na gestão das consequências da mudança climática. Isso envolve não apenas a avaliação dos riscos imediatos, mas também uma análise aprofundada das tendências futuras e dos possíveis cenários de impacto. Dessa forma, as estratégias de adaptação podem ser desenvolvidas de maneira mais eficaz e abrangente, garantindo a resiliência das infraestruturas e dos sistemas organizacionais diante dos desafios climáticos em constante evolução.

Tabela 2. Metodologias de Análise de Risco Climático para o setor de transportes - mundo.

Estrutura	País de Origem	Descrição
<p><i>Climate Change and Extreme Weather Vulnerability Assessment Framework</i> [23].</p>	<p>Estados Unidos</p>	<p>Enquanto a maioria das estruturas de planejamento de adaptação concentra-se na infraestrutura em nível de sistema, a estrutura conceitual do <i>Federal Highway Administration</i> (FHWA) concentra-se na infraestrutura em nível de ativo ou projeto. Seu objetivo é identificar as principais considerações, perguntas e recursos que podem ser usados para projetar e implementar uma avaliação da vulnerabilidade à mudança climática. Ele dá uma visão geral das principais etapas na condução de avaliações de vulnerabilidade e usa exemplos de práticas para demonstrar uma variedade de maneiras de coletar e processar informações.</p>
<p><i>uRisk Management for Roads in a Changing Climate: A Guidebook to the RIMAROCC Method</i> [24].</p>	<p>União Européia</p>	<p>A estrutura RIMAROCC permite a análise e o planejamento da adaptação a nível de sistema, corredor de transportes e ativos individuais, analisando vários "domínios de especialização", tais como pavimentos, bueiros e pontes, geotecnia, meio ambiente, drenagens e nível do mar. O RIMAROCC é um método onde o objetivo é facilitar a produção de um Estudo de Gerenciamento de Risco por ou para uma autoridade rodoviária. O método pode ser usado para mitigar ameaças, reduzir vulnerabilidades e minimizar as consequências de um evento.</p>
<p><i>Climate Change Uncertainty and the State Highway Network: A Moving Target</i> [25].</p>	<p>Nova Zelândia</p>	<p>A Transit Nova Zelândia avaliou os impactos potenciais da mudança climática nas rodovias estaduais e desenvolveu uma resposta com base nas informações disponíveis. A Transit utilizou um processo de triagem em duas etapas para determinar a necessidade e a viabilidade de tomar medidas antecipadas para proteger a infraestrutura dos impactos potenciais futuros da mudança climática. A primeira etapa avaliou a necessidade de agir no presente. A avaliação revelou que a política e a prática atuais podem não ser suficientes para proteger adequadamente as pontes (e bueiros com uma vida útil de mais de 25 anos) dos impactos potenciais da mudança climática. A segunda etapa avaliou a viabilidade de agir agora para proteger as pontes rodoviárias estaduais dos impactos potenciais futuros da mudança climática.</p>

Estrutura	País de Origem	Descrição
<p><i>Scottish Road Network Climate Change Study</i> [26].</p>	<p>Escócia</p>	<p>As tendências da mudança climática na Escócia são examinadas para ver como elas podem afetar a rede rodoviária, apresentadas a partir dos domínios de projeto, operação, pesquisa adicional e revisão de políticas. Os resultados mostram que a mudança climática no futuro próximo pode ser suficientemente significativa para justificar o ajuste das práticas atuais.</p>
<p><i>RIVA – Risikoanalyse wichtiger Verkehrsachsen des Bundesfernstraßennetzes im Kontext des Klimawandels</i> [27].</p>	<p>Alemanha</p>	<p>A RIVA se concentra na avaliação dos riscos da mudança climática para a rede viária federal. O risco para a infraestrutura rodoviária decorrente da mudança climática é descrito por um modelo de indicador hierárquico e consiste em quatro dimensões: (i) Clima, (ii) Vulnerabilidade, (iii) Efeito Técnico e (iv) Criticidade. A metodologia desenvolvida permite uma análise/avaliação de risco em toda a rede com base em dados climáticos regionalizados e dados padronizados de infraestrutura rodoviária.</p>
<p><i>Climate Change Risk Assessment</i> [28].</p>	<p>Reino Unido</p>	<p>A Estratégia e Estrutura de Adaptação à Mudança Climática da Agência de Rodovias do Reino Unido destina-se a identificar e gerenciar os riscos da mudança climática na infraestrutura rodoviária e nas operações de suas agências de transporte. A Estrutura busca responder a três questões-chave: 1. Qual é o nível atual e futuro de risco ou oportunidade? 2. O risco ou oportunidade está sendo gerenciado, levando em consideração as ações do governo e outras adaptações? 3. Existem benefícios de ações posteriores nos próximos cinco anos, além do que já está planejado?</p>
<p><i>National Climate Change Adaptation Framework</i> [29].</p>	<p>Austrália</p>	<p>A Estrutura Nacional de Adaptação à Mudança Climática, que tem um objetivo de avaliar os riscos da mudança climática na costa australiana, foi aprovada pelo Conselho de Governos Australianos (do inglês, <i>Council of Australian Governments - COAG</i>) em 2007. A Estrutura estabelece o que o governo australiano fará para apoiar os esforços em todos os níveis de governo, empresas e comunidade, para melhor antecipar, gerenciar e se adaptar aos impactos da mudança climática.</p>
<p>Projeto AdaptaVias [30].</p>	<p>Brasil</p>	<p>O Projeto AdaptaVias tem como objetivo conduzir um levantamento abrangente dos impactos e riscos resultantes das alterações climáticas na infraestrutura federal de transportes terrestres com base no AR5 (IPCC, 2014) e no AdaptaBrasil [s.n], tanto nas rodovias quanto nas ferrovias, tanto as já existentes quanto às planejadas. Este levantamento</p>

Estrutura	País de Origem	Descrição
		fornece informações essenciais para embasar decisões estratégicas visando a adaptação aos impactos provocados pela mudança climática.

Fonte: Baseado em Transit New Zealand [25], Scottish Executive [26], Era-Net Road [24], U.K. Highways Agency [28], U.S. Dot [23], BASt [27], Australian Government [29], Galla [3] e Ministério dos Transportes [30] e De Abreu [20].

Ao focar nas dimensões de infraestrutura física e ativos, a estratégia de adaptação visa não apenas entender os desafios iminentes, mas também promover soluções inovadoras para fortalecer a resiliência do sistema, incluindo a implementação de tecnologias avançadas, práticas sustentáveis e a integração de abordagens eficazes de gestão de riscos. Isso não apenas fortalece a capacidade de resposta à mudança climática, mas também contribui para a promoção da sustentabilidade ambiental e para a redução do impacto negativo das atividades humanas no meio ambiente.

Além disso, a abordagem enfatiza o papel crucial do gerenciamento organizacional, buscando estabelecer estruturas eficazes que facilitem a tomada de decisões informadas e a coordenação eficiente das atividades de adaptação. Ao promover uma cultura organizacional voltada para a resiliência climática, as instituições podem fortalecer sua capacidade de resposta às mudanças ambientais, garantindo a sustentabilidade a longo prazo. De uma maneira geral, as estruturas desenvolvidas ao redor do mundo apresentam em comum os passos apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Etapas comuns das estruturas desenvolvidas ao redor do mundo.

Passos	Descrição
Etapa 1 - Estabelecimento do Contexto	Nessa etapa, são definidos as metas e os objetivos da ARC, é realizada a coleta de dados de infraestrutura e dados climáticos projetados, e são criados workshops ou painéis de especialistas na área (incluindo engenheiros rodoviários, gerentes de ativos, profissionais de adaptação à mudança climática, gerentes de inovação e gerentes de projeto) para entender a realidade a qual a análise está inserida.
Etapa 2 - Identificação de risco	Esta etapa busca identificar os riscos da mudança climática, que leva em consideração a exposição das infraestruturas às ameaças climáticas e suas vulnerabilidades (sensibilidades e capacidades adaptativas). Isto envolve a identificação de áreas de foco regional ou prioridades, bem como os principais sistemas de infraestrutura afetados.
Etapa 3 - Análise de Risco	Para a análise de risco, as características do impacto climático recebem classificações qualitativas (por exemplo, baixa, média, alta). Geralmente essa etapa consiste apenas no cálculo da probabilidade de ocorrência do risco e suas consequências. Outros aspectos são analisados em casos específicos.

Passos	Descrição
Etapa 4 - Avaliação de risco	Inicialmente, é necessário categorizar os resultados da análise de risco para estabelecer as prioridades de adaptação. Esse processo envolve a inserção dos dados da fase anterior em uma matriz de risco, que utiliza um sistema de coordenadas cartesianas. Nessa matriz, variáveis como probabilidade, consequência/criticidade e impacto são associadas aos efeitos das mudanças climáticas. Posteriormente, a matriz é minuciosamente analisada, e os riscos são hierarquizados. A pontuação de prioridade de risco é determinada com base na combinação de probabilidade e impacto, sendo que maior probabilidade e impacto resultam em uma pontuação de prioridade mais elevada. Existem diversas tipologias de matrizes, desde as mais simples, que categorizam áreas discretas de baixo a médio risco, até matrizes mais elaboradas ou multidimensionais. Em alguns casos, as Etapas 3 e 4 podem ser integradas em uma única fase denominada avaliação de risco.
Etapa 5 - Tratamento do Risco	Para o tratamento de riscos, deve-se identificar, avaliar e selecionar as escolhas de medidas de adaptação, e implementar a opção escolhida. No processo de identificação das estratégias de mitigação dos riscos para posterior avaliação e escolha podem ser utilizadas tabelas com classes genéricas de possibilidades de adaptação. Já para a implementação, pode-se estabelecer uma estrutura de monitoramento para coleta de dados sobre o clima, desempenho dos ativos e operações. É crucial a conexão entre o planejamento da ação adaptativa à mudança climática analisada, com os programas de gestão de ativos de transporte.

Fonte: Baseado em Galla [3] e de Abreu [20].

Muitas agências definiram as restrições de suas estruturas de adaptação baseadas em risco, bem como os obstáculos internos e externos que podem impedir a implementação da estrutura, ao mesmo tempo em que abordam o desenvolvimento destas, conforme expresso na Tabela 4. Essa abordagem visa não apenas a compreensão dos desafios envolvidos, mas também a formulação de estratégias eficazes para superá-los, tornando o processo de adaptação mais robusto e eficiente.

Tabela 4. Restrições e obstáculos das estruturas de ARC de agências de transporte ao redor do mundo.

Dificuldade	Descrição
Limitações de dados de ativos de infraestrutura ou climáticos	Essa é a principal barreira para a maioria das estruturas, sendo categorizada de acordo com a disponibilidade e acessibilidade em: (i) não disponíveis (que não foram coletados); (ii) inconsistentes (apesar de terem sido coletados, não estão completos ou padronizados); e (iii) de difícil acesso (não estão disponíveis em bases de dados de acesso aberto, apesar de existirem em bases de empresas privadas - por exemplo concessionárias).
Tratamento de riscos	A determinação dos níveis de risco considerados aceitáveis, a importância atribuída às diversas categorias de risco e seus limites – isto é, a maneira como o risco é percebido e classificado – também foram obstáculos relevantes no ponto de vista de diversas autoridades. Mostrava desafiador inclusive para os tomadores de decisão estabelecer uma relação clara entre a necessidade imediata de ação e os riscos de longo prazo ou de efeito distante.
Disponibilidade de recursos suficientes	De acordo com as agências, não havia meios financeiros suficientes para realizar o planejamento de adaptação ou para construir ou melhorar as estruturas de planejamento de adaptação, bem como, recursos humanos

Dificuldade	Descrição
Barreiras legais, políticas e regulatórias	<p>adequados para planejar as medidas de adaptação, e existe uma relação direta entre a carência de mão-de-obra e a falta de recursos financeiros, já que receitas adicionais permitiriam a contratação de pessoal qualificado adicional.</p> <p>As agências de transporte enfrentam desafios ao tentar identificar os riscos associados à mudança climática, frequentemente devido à falta de compreensão dos riscos climáticos específicos que enfrentam. Adicionalmente, empresas de transporte privadas e independentes deparam-se com obstáculos regulatórios, uma vez que a aprovação de seus projetos de financiamento ou investimento requer a autorização de órgãos governamentais.</p>
Demanda futura de transporte incerta do sistema	<p>Para as agências, é difícil avaliar a necessidade de medidas adaptativas quando não se tem clareza sobre as demandas futuras de transportes, e as mesmas precisam fazer suposições acerca de tais demandas, de tal modo que a incerteza em torno das exigências de medidas de adaptação à mudança climática acaba sendo ampliada pelas incertezas em torno das exigências futuras de demanda. Desse modo, algumas agências (como a Agência Australiana de Transportes) optaram por não incluir os efeitos da mudança climática na demanda de viagens, concentrando seus esforços nos impactos físicos sobre a infraestrutura e os ativos.</p>

Fonte: Baseado em Galla [3] e de Abreu [20].

Os resultados expostos na Tabela 4 indicam que a adaptação do setor de transporte à mudança climática enfrenta diversas barreiras. A escassez e inconsistência nos dados de ativos de infraestrutura e climáticos dificultam a coleta e análise necessárias. Além disso, a gestão de riscos apresenta desafios na determinação de níveis aceitáveis e na clareza da relação entre a urgência de ação e os riscos de longo prazo. A disponibilidade insuficiente de recursos financeiros e humanos, juntamente com barreiras legais e regulatórias, complica ainda mais o planejamento e a implementação de medidas adaptativas. A incerteza em torno da demanda futura de transporte adiciona complexidade, com algumas agências optando por não considerar os efeitos da mudança climática nesse aspecto. Superar essas barreiras exigirá esforços colaborativos, aprimoramento na coleta de dados e desenvolvimento de políticas adaptativas eficazes.

Superar essas barreiras críticas demandará não apenas esforços colaborativos entre diversos setores e partes interessadas, mas também um aprimoramento substancial na coleta e análise de dados históricos [20]. Além disso, é imperativo o desenvolvimento de políticas adaptativas eficazes, capazes de se ajustarem dinamicamente à mudança climática em constante evolução [12]. Essa abordagem dinâmica, que combina cooperação ampla, dados robustos e políticas ágeis, é essencial para enfrentar os desafios complexos e interconectados associados aos impactos da mudança climática [21,22]. A busca por soluções sustentáveis e resilientes deve ser guiada por uma visão de longo prazo, visando não apenas a mitigação, mas também a adaptação efetiva para garantir a sustentabilidade do nosso planeta diante das transformações ambientais [31].

Além disso, uma inovação significativa reside no reconhecimento de que os riscos podem originar-se tanto dos potenciais impactos resultantes da mudança climática quanto das respostas a elas. Essa abordagem promove um pensamento que transcende as fronteiras setoriais e regionais, estabelecendo conexões entre os fatores de risco físicos e socioeconômicos. Avançar

na avaliação dos riscos da mudança climática dessa maneira é crucial para uma tomada de decisão mais embasada, visando a redução dos impactos negativos da mudança climática [9].

5. Considerações Finais

A infraestrutura viária representa um ativo crucial para governos e economias globais, desempenhando um papel essencial no transporte de alimentos, bens de consumo e facilitação das deslocamentos humanos para trabalho, estudo e outras atividades. Estudos anteriores evidenciaram que, durante eventos climáticos extremos ou prolongados, a integridade e a segurança da infraestrutura rodoviária podem ser comprometidas. Isso ressalta a urgência de integrar considerações sobre mudança climática em projetos convencionais, abrangendo toda a vida útil de pavimentos, pontes e sistemas de drenagem, entre outras estruturas, a fim de garantir sua resiliência diante dos desafios climáticos.

Este estudo é crucial para formuladores de políticas públicas e outras partes interessadas por várias razões significativas. Primeiramente, fornece uma compreensão aprofundada das metodologias de Análise de Risco Climático (ARC) no setor de transportes, permitindo que formuladores de políticas compreendam melhor os desafios e as oportunidades relacionadas à adaptação à mudança climática. Além disso, ao destacar as vantagens e identificar desafios específicos dessas metodologias, o estudo capacita formuladores de políticas a tomar decisões informadas e estratégicas para fortalecer a resiliência da infraestrutura de transporte. A abordagem integrada enfatizada no estudo também é essencial, pois proporciona uma visão holística, facilitando a formulação de políticas abrangentes e eficazes.

A consideração abrangente dos elementos essenciais em uma ARC oferece uma base sólida para o desenvolvimento de estratégias que abordem não apenas os impactos imediatos, mas também os desafios de longo prazo relacionados à mudança climática no setor de transporte. Em última análise, esse conhecimento é fundamental para a criação de políticas públicas que promovam a sustentabilidade, a segurança e a eficiência no transporte, beneficiando a sociedade como um todo.

Referências

1. Evans, C.; Tsolakis, D.; Naudé, C. Framework to Address the Climate Change Impacts on Road Infrastructure Assets and Operations. In Proceedings of the ATRF Conference; 2009.
2. Markolf, S.A.; Hoehne, C.; Fraser, A.; Chester, M. V.; Underwood, B.S. Transportation Resilience to Climate Change and Extreme Weather Events – Beyond Risk and Robustness. *Transp Policy (Oxf)* **2019**, *74*, 174–186, doi:10.1016/j.tranpol.2018.11.003.
3. Galla, K.K. *Climate Change Risk Assessment of Road Infrastructure for the Town of Essex*; 2021;
4. Quinn, A.; Ferranti, E.; Hodgkinson, S.; Jack, A.; Beckford, J.; Dora, J. Adaptation Becoming Business as Usual: A Framework for Climate-Change-Ready Transport Infrastructure. *Infrastructures (Basel)* **2018**, *3*, 10, doi:10.3390/infrastructures3020010.
5. de Abreu, V.H.S.; Monteiro, T.G.M.; de Oliveira Vasconcelos, A.; Santos, A.S. Climate Change Adaptation Strategies for Road Transportation Infrastructure: A Systematic Review on Flooding Events. In; 2023; pp. 5–30.
6. Wang, T.; Qu, Z.; Yang, Z.; Nichol, T.; Clarke, G.; Ge, Y.-E. Climate Change Research on Transportation Systems: Climate Risks, Adaptation and Planning. *Transp Res D Transp Environ* **2020**, *88*, 102553, doi:10.1016/j.trd.2020.102553.

7. Chausson, A.; Turner, B.; Seddon, D.; Chabaneix, N.; Girardin, C.A.J.; Kapos, V.; Key, I.; Roe, D.; Smith, A.; Woroniecki, S.; et al. Mapping the Effectiveness of Nature-based Solutions for Climate Change Adaptation. *Glob Chang Biol* **2020**, *26*, 6134–6155, doi:10.1111/gcb.15310.
8. Achebe, J.; Oyediji, O.; Saari, R.K.; Tighe, S.; Nasir, F. Incorporating Flood Hazards into Pavement Sustainability Assessment. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* **2021**, *2675*, 1025–1042, doi:10.1177/03611981211014525.
9. Simpson, N.P.; Mach, K.J.; Constable, A.; Hess, J.; Hogarth, R.; Howden, M.; Lawrence, J.; Lempert, R.J.; Muccione, V.; Mackey, B.; et al. A Framework for Complex Climate Change Risk Assessment. *One Earth* **2021**, *4*, 489–501, doi:10.1016/j.oneear.2021.03.005.
10. Auerbach, M.; Herrmann, C. Adaptation of the Road Infrastructure to Climate Change. In *Materials and Infrastructures 2*; Wiley, 2016; pp. 193–206.
11. The World Bank *Integrating Climate Change into Road Asset Management*; Washington DC 20433, 2017;
12. de Abreu, V.H.S.; Santos, A.S.; Monteiro, T.G.M. Climate Change Impacts on the Road Transport Infrastructure: A Systematic Review on Adaptation Measures. *Sustainability* **2022**, *14*, 8864, doi:10.3390/su14148864.
13. de Abreu, V.H.S.; Ribeiro, F.B.; Santos, A.S. Identificação de Indicadores de Vulnerabilidade Para Análise de Risco Climático Da Infraestrutura Rodoviária. . In *Via Viva* 2022; 2022.
14. Intergovernmental Panel On Climate Change – IPCC *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Cambridge University Press: Marlborough, MA, USA, 2014, 2014;
15. Pérez-Morales, A.; Gomariz-Castillo, F.; Pardo-Zaragoza, P. Vulnerability of Transport Networks to Multi-Scenario Flooding and Optimum Location of Emergency Management Centers. *Water (Basel)* **2019**, *11*, 1197, doi:10.3390/w11061197.
16. Ghadge, A.; Wurtmann, H.; Seuring, S. Managing Climate Change Risks in Global Supply Chains: A Review and Research Agenda. *Int J Prod Res* **2020**, *58*, 44–64, doi:10.1080/00207543.2019.1629670.
17. De Abreu, V.H.S.; Monteiro, T.G.M.; Ribeiro, F.B.; Santos, A.S. Identificação De Ameaças E Impactos Da Mudança Climática Na Infraestrutura De Transporte Rodoviário. *MIX Sustentável* **2022**, *8*, 142–156, doi:10.29183/2447-3073.MIX2022.v8.n3.142-156.
18. De Abreu, V.H.S.; de Lima, G.B.C.; Monteiro, T.G.M.; Santos, A.S. Implications of Climate Change for the Brazilian Road Infrastructure. In *COVID-19 and Climate Change in BRICS Nations* ; 2023.
19. AdaptaBrasil MCTI Sobre o AdaptaBrasil. Disponível em: <https://adaptaBrasil.mcti.gov.br/>.
20. de Abreu, V.H.S. Diretrizes Para Um Plano Setorial De Adaptação Da Infraestrutura Rodoviária Brasileira Frente Aos Possíveis Impactos Da Mudança Do Clima. , 2023.
21. de Abreu, V.H.S.; Ribeiro, F.B.; Santos, A.S. Impactos Da Mudança Climática Na Infraestrutura De Transporte Rodoviário À Base De Revisão Bibliográfica. . In *Proceedings of the 35° ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*; 2021.
22. Abreu, V.H.S. de; Ribeiro, F.B.; Santos, A.S. Impactos Da Mudança Climática Na Infraestrutura de Transporte Terrestre à Luz de Revisão Bibliográfica Com Abordagem Bibliométrica. *Via Viva* **2021**, *4*, 20–35, doi:10.54507/viaviva.2021.01.

23. U.S. Department of Transportation - U.S. DOT *Climate Change & Extreme Weather Vulnerability Assessment Framework*; 2015;
24. Era-Net Road *Risk Management For Roads In A Changing Climate. A Guidebook to the RIMAROCC Method.*; 2010;
25. Transit New Zealand *Climate Change Uncertainty and the State Highway Network: A Moving Target*; 2005;
26. Scottish Executive Scottish Road Network Climate Change Study 2005.
27. BAST - Bundesanstalt für Straßenwesen *Risikoanalyse Wichtiger Verkehrsachen Des Bundesfernstraßennetzes Im Kontext Des Klimawandels - RIVA*; 2017;
28. U.K. Highways Agency *UK Climate Change Risk Assessment: Government Report*; 2012;
29. Australian Government *National Climate Change Adaptation Framework*; 2021;
30. Ministério dos Transportes Projeto AdaptaVias. Impactos e Riscos Da Mudança Do Clima Nos Setores Rodoviário e Ferroviário.
31. Santos, A.S.; de Abreu, V.H.S.; de Assis, T.F.; Ribeiro, S.K.; Ribeiro, G.M. An Overview on Costs of Shifting to Sustainable Road Transport: A Challenge for Cities Worldwide. In; 2021; pp. 93–121.

Produção de argamassa ecológica de alto desempenho com adição de rejeito de minério de ferro.

Production of eco-friendly high-performance mortar with the addition of iron ore tailings.

Abner Araújo Fajardo, Mestre em Construção Civil, UFMG

Fajardo.aabner@gmail.com

Sílvia Roberta Souza, Mestre em Construção Civil, UFMG

silvia.rsouza@yahoo.com

Jordana Gonçalves de Macedo, Graduanda em Engenharia Civil, UFMG

jordanagdmacedo@gmail.com

Vinicius Ferreira Lanna, Graduando em Engenharia Civil, UFMG

vferreiralanna@gmail.com

White José dos Santos, Ph.D em Construção Civil, UFMG

whitejsantos@gmail.com

Resumo

Este estudo investigou o desempenho mecânico e a durabilidade de argamassas estruturais de alto desempenho com adição mineral de rejeitos de minério de ferro (IOT) aos 112 dias de idade. As argamassas contendo IOT demonstraram porosidades inferiores a 2,1%, alta resistência à compressão (> 95 MPa) e a flexão (37% superior) e redução de 4,55% nas emissões de CO₂. Conclui-se que a incorporação de IOTs em argamassas proporciona melhorias nas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade, além de ser ecologicamente mais sustentável.

Palavras-chave: Rejeito de minério de ferro; argamassa de alto desempenho; argamassa ecológica

Abstract

This study investigated the mechanical performance and durability of high-performance structural mortars with mineral admixture of iron ore tailings (IOT) at 112 days of age. Mortars containing IOT showed porosities lower than 2.1%, high compressive strength (> 95 MPa) and flexural strength (37% higher) and a reduction of 4.55% in CO₂ emissions. It is concluded that the incorporation of IOTs in mortars provides improvements in physical, mechanical and durability properties, in admixture to being ecologically more sustainable.

Keywords: Iron ore tailings; High performance mortar; Eco-friendly mortar

1. Introdução

O Brasil, como o segundo maior produtor mundial de minério de ferro, detém uma significativa importância econômica, ficando atrás somente da Austrália. Em 2022, a produção brasileira totalizou 410 milhões de toneladas em todo o território nacional, a Austrália produziu cerca de 880 milhões de toneladas, e a China 380 milhões de toneladas conforme dados do [1]. O setor de mineração gerou 204 mil empregos diretos e 2,25 milhões de empregos ao longo de toda a cadeia produtiva e do mercado [2]. O beneficiamento do minério de ferro gera um subproduto conhecido como rejeito de minério de ferro, cujo descarte acarreta sérios riscos para a população local e causa diversos impactos ambientais [3]. Toneladas de rejeitos são depositadas em barragens ou empilhadas, desencadeando processos de lixiviação e contaminando as águas superficiais, subterrâneas e o solo com metais pesados presentes [4;5]. Nos últimos anos, o Brasil enfrentou duas tragédias decorrentes do rompimento de barragens, ocorridas nas cidades de Mariana (em 2015) e Brumadinho (em 2019), ambas situadas no Estado de Minas Gerais.

A construção civil surge como uma alternativa viável para a destinação do rejeito de minério de ferro, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais. Diversas pesquisas têm sido conduzidas para explorar a aplicação do rejeito de minério de ferro na produção de diferentes subprodutos utilizados na construção civil, como sua incorporação em asfalto ou pavers [6], tintas e materiais coloridos [7], substituindo agregados [8], compósitos cimentícios [9 -11]. Utilizar esses resíduos como adição às misturas de cimento tende a beneficiar a sociedade do ponto de vista ambiental, uma vez que a produção do cimento Portland é responsável pela emissão de CO₂, [10;12]. Deste modo, o objetivo geral deste trabalho é estudar o comportamento de argamassas estruturais de alto desempenho, com uso de adição mineral dos rejeitos de minério de ferro *in natura* na idade de 112 dias.

2. Materiais e métodos

Os materiais utilizados foram: cimento CPV-ARI; areia normal fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT); Sílica ativa da marca Tecnosil (% SiO₂ > 90%, superfície específica: 20.000 m²/kg, massa específica: 2220 kg/m³, diâmetro da partícula 200 nm⁻¹); aditivo superplastificante à base de policarboxilatos, de pega normal MC-PowerFlow 4001 da marca MC-Bauchemie (densidade 1,12 kg/m³). O rejeito de mineração de ferro (IOT - Itabirito de Minério de Ferro) no estado *in natura*, obtidos de uma mina localizada no quadrilátero ferrífero em Minas Gerais. Os traços das argamassas estão na tabela 1.

Tabela 1: Traços das amostras em volume

Argamassa	Cimento	Areia	Sílica Ativa	Rejeito de minério de ferro	Água (a/c)	Superplastificante
REF	1	3	25%	0%	0,375	2%
IOT	1	3	25%	40%	0,375	3%
Consumo por m ³						
REF	515	1545	129	0	193	10
IOT	489	1467	122	196	183	15

Após a definição do traço dos materiais secos, o teor de água e aditivo superplastificante foram determinados. Para isso, foi utilizado o espalhamento na *Flow table* [13].

Utilizou-se a betoneira para misturar os corpos de prova, em seguida utilizou-se a mesa vibratória para o adensamento. Para o processo de cura, deixou os corpos de prova submerso em água. Após a cura, foram determinadas:

- a) a resistência à compressão (5 corpos de prova cúbicos - 5x5x5 cm) [14], máquina universal de ensaios EMIC, modelo DL20000, com velocidade de carregamento de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s;
- b) resistência à tração na flexão (3 corpos de prova prismáticos - 4x4x16 cm) [15], máquina universal de ensaios EMIC, modelo DL20000, com velocidade de carregamento de $(1,00 \pm 0,15)$ MPa/s.;
- c) porosidade [16] a água com uso de balança com precisão de 0,01 g;
- d) resistividade elétrica volumétrica e superficial (corpo de prova cilíndrico de Ø10x20 cm) [17 -18], utilizou-se o equipamento Resipod, que exhibe os valores em kΩcm. O valor obtido do display do aparelho deve ser dividido por $2\pi a$ (onde “a” é o espaçamento das sondas, ou 3.8 cm, ou 5.0 cm). O corpo de prova ficou submerso em água por um período de 72 horas antes da realização do ensaio. O equipamento utilizado foi o Resipod da PROCEQ, cuja precisão é de $(\pm 0,2$ a $\pm 2,0$ kWcm);
- e) para a avaliação dos poros por meio do MEV, moldou-se um corpo de prova cúbico (5x5x5 cm) pastas. Após a cura, os corpos de prova foram cortados em serra de disco diamantado, extraindo-se da região interna amostras de dimensões aproximadamente (1x1x1) cm para fazer as imagens de MEV-EDS.

Para a análise quantitativa dos poros em imagens de MEV, três fragmentos foram coletados em diferentes locais para cada tipo de argamassa e pasta, totalizando 20 imagens por tipo. A análise foi conduzida utilizando o software Image J e escalas de cinza, variando de 0 a 255, onde valores mais próximos de 0 correspondem à cor preta e valores mais próximos de 255 à cor branca. A determinação dos poros foi baseada na proximidade com a faixa de 0, considerando a imagem como um todo e levando em conta a contribuição do agregado para a porcentagem total de poros.

3. Resultados

A análise granulométrica do rejeito, da sílica ativa e do cimento (conforme mostrado na Tabela 2) revela que o rejeito é mais fino do que o cimento, conforme esperado. No entanto, acredita-se que possa haver uma faixa ainda mais fina (com partículas menores que 1 µm) que não seja detectável pelo granulômetro. O rejeito de minério de ferro apresenta como principais fases cristalinas: quartzo, goethita, hematita e magnetita.

Tabela 2: Parâmetros granulométricos dos materiais.

Decil	Amostra		
	IOT	CP-V	Sílica Ativa
D ₉₀	12,1	28,7	24,41
D ₅₀	2,9	8,3	13,74
D ₁₀	0,4	0,7	3,76
Médio	4,7	11,8	13,92

Ao avaliar as amostras com 112 dias de cura, Figura 1, a amostra de IOT registrou um resultado de 95,42 MPa, enquanto a amostra de REF alcançou o valor de 94,25 MPa. A amostra de IOT apresentou um aumento de desempenho de 3,22% em relação à amostra REF. Além

disso, o resultado da amostra de IOT destacou-se em comparação com outros estudos que analisaram com 91 dias, como os 66,00 MPa de [19] e os 62,00 MPa de [20]. Observa-se que na análise da resistência à tração na flexão, o IOT apresentou um valor de 8,26 MPa, enquanto a referência registrou 6,21 MPa. Notavelmente, a argamassa de rejeito exibiu um desempenho 33% superior em relação à argamassa de referência.

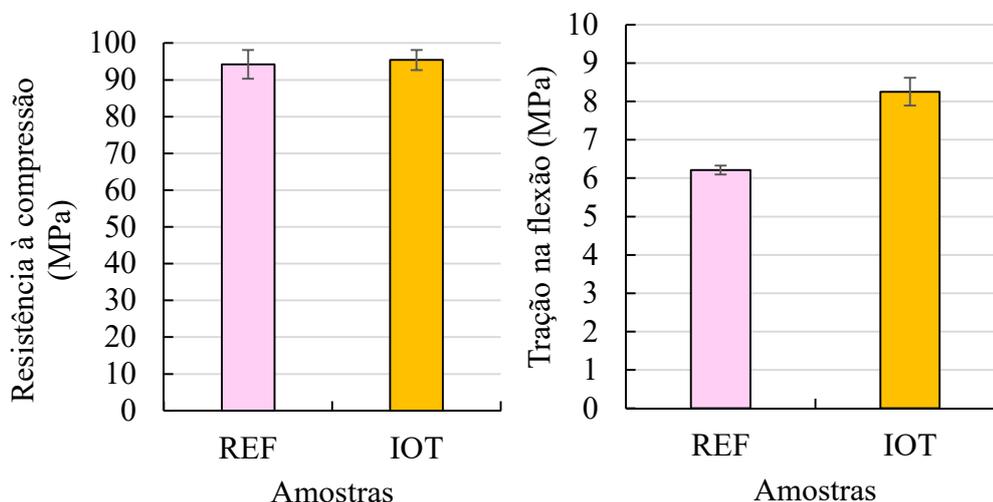


Figura 1: Resultados da compressão e tração na flexão das argamassas. Fonte: elaborado pelos autores.

As argamassas ficaram submersa em água até a realização dos ensaios e foi utilizado o equipamento Resipod, basendo no método de quatro pontos, também conhecido como método Wenner [21-22]. A resistividade elétrica, sendo um ensaio não destrutivo, pode ser utilizado como método para avaliar a qualidade e durabilidade de materiais [23]. No caso da resistividade elétrica superficial (Figura 2), a argamassa de IOT apresentou um valor de 833 k Ω .cm, enquanto a argamassa de REF registrou 680 k Ω .cm. Portanto, a argamassa de IOT exibiu um valor 22,55% superior ao da argamassa de REF. As argamassas alcançaram em todas as amostras o limite máximo de medição do aparelho para resistividade elétrica volumétrica (Figura 2), registrando 1.973 Ω .m. Não é possível identificar qual argamassa apresentou o maior valor nem determinar esse valor. A resistividade elétrica volumétrica tem uma grande importância para a avaliação da sua durabilidade [24].

Os resultados na Figura 3 indicam que a amostra de REF registrou a maior porosidade aberta, com 2,12%, enquanto o IOT atingiu 1,64%. Consequentemente, a argamassa de IOT apresentou um desempenho superior, mostrando uma redução de 22,52% em comparação com a argamassa de REF. Nas análises de poros quantitativos, realizadas por MEV e tratamento de imagens binárias, os resultados das argamassas mostraram valores semelhantes à porosidade aberta: 1,68% para o REF e 1,51% para o IOT. Portanto, a argamassa de IOT registrou uma diminuição de 10,12% em relação ao REF. Quanto aos resultados das pastas, também houve proximidade nos valores de porosidade aberta e nos poros quantitativos por MEV das argamassas. A argamassa de IOT atingiu 2,02%, enquanto a de REF registrou 1,65%, resultando em um aumento de 22,42% para a argamassa de IOT em relação à de REF

As imagens da microestrutura (Figura 4) sustentam os resultados mecânicos e os indicadores de durabilidade, uma vez que revelam um baixo teor de porosidade. Isso resulta em uma microestrutura compacta que, por sua vez, aumenta as propriedades mecânicas e de durabilidade.

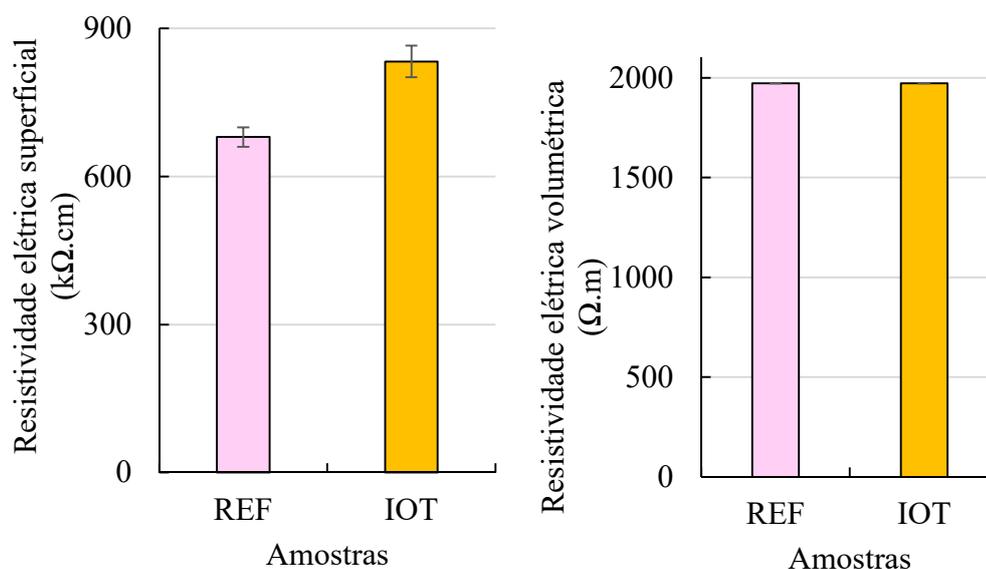


Figura 2: Resultados da resistividade elétrica volumétrica e superficial. Fonte: elaborado pelos autores.

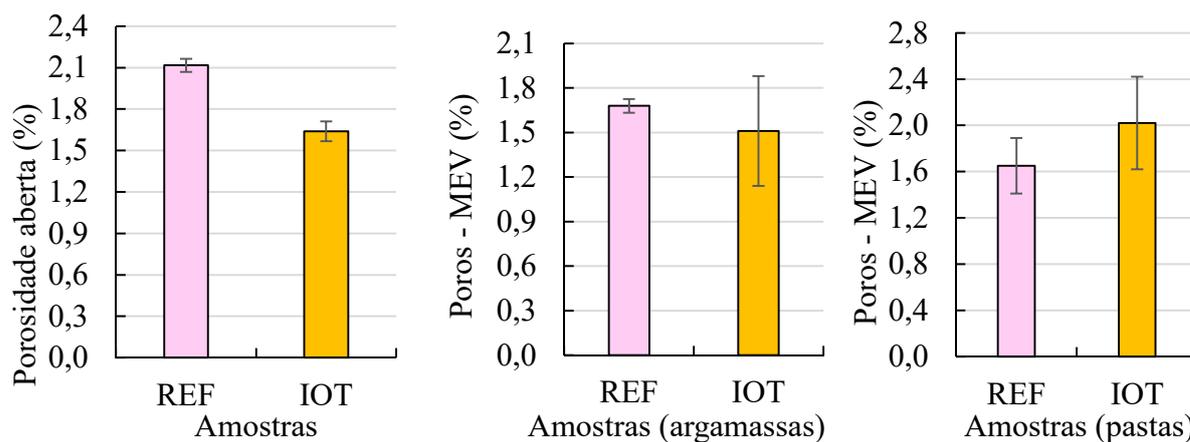


Figura 3: Resultados da porosidade aberta, poros por meio do MEV das argamassas e pastas. Fonte: elaborado pelos autores.

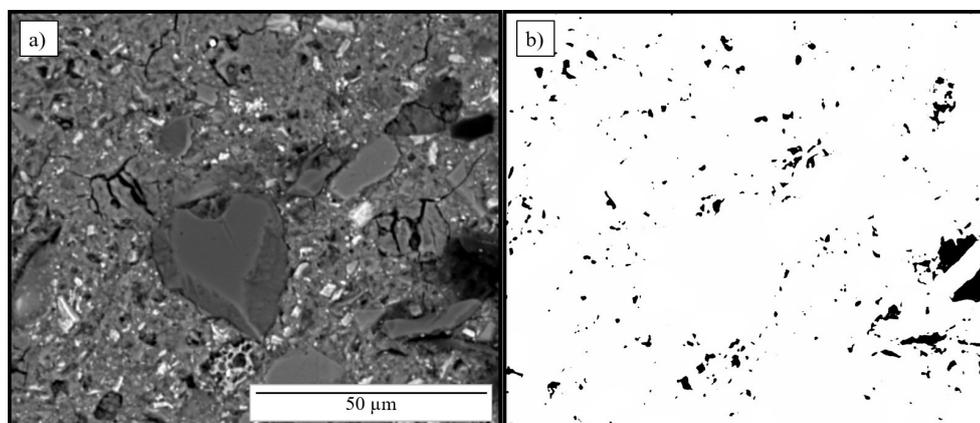


Figura 4: Imagens de (a) MEV-BSE e (b) poros em imagem binária da pasta de rejeito de minério de ferro. Fonte: elaborado pelos autores.

O equivalente de dióxido de carbono ($\text{CO}_2\text{-eq}$) em relação a 1 m^3 de compósito cimentício (argamassa) foi calculado para cada composição investigada nos compósitos deste estudo, juntamente com algumas referências que conduziram estudos similares/complementares [25]. Multiplicando a quantidade de cada componente pela sua emissão de CO_2 equivalente por quilograma de material, é possível obter um índice correspondente. Assim sendo, observa-se na Figura 5, que a argamassa de rejeito de minério de ferro emitiu $460,66 \text{ CO}_2\text{-eq/Kg}$ sendo menor do que a argamassa de REF, $482,28 \text{ CO}_2\text{-eq/Kg}$. Assim sendo, o rejeito emitiu 4,69% menos de CO_2 em relação a argamassa de referência.

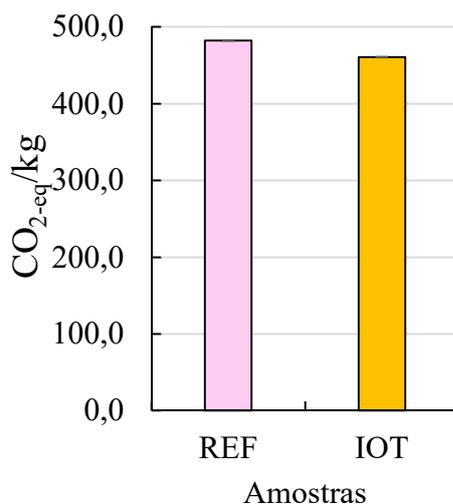


Figura 5: Gráfico de emissão de CO_2 das argamassas

4. Análises dos Resultados

O aumento da resistência à compressão da amostra de IOT, 3,22%, neste estudo pode ser atribuído ao empacotamento de partículas e à granulometria fina do rejeito de minério de ferro, que provavelmente contribuíram para a formação de pontos de nucleação e para a promoção das reações da sílica ativa e do cimento. O aumento de 33% na resistência à flexão à tração na argamassa de IOT em relação à argamassa de REF pode ser atribuído à melhor aderência das partículas às pastas de cimento. Influenciada positivamente pela sílica ativa como material pozolânico, juntamente com a nucleação facilitada pela incorporação de IOT, potencializando a hidratação dos compósitos cimentícios. Essa melhoria também pode ser correlacionada ao eficiente empacotamento das partículas do rejeito de minério de ferro, favorecido por uma baixa relação água/cimento (0,375).

Os valores de resistividade elétrica volumétrica são analisados por faixas de níveis de penetração de cloretos, sendo o valor de $1.973 \Omega \cdot \text{m}$ se encontrando na faixa de muito baixa para penetração de cloretos [26]. Para a resistividade elétrica superficial, a argamassa de IOT, teve um aumento de 22,55% e estando na faixa de potencial de corrosão insignificante, de acordo com [27]. O fator a/c de 0,375, pode ter contribuído positivamente para o resultado da resistividade elétrica na pesquisa atual. Além disso, a presença de 25% de sílica ativa pode ter sido outro fator que resultou em uma resistividade elevada. A sílica ativa é conhecida por induzir refinamento dos poros e redução da permeabilidade do concreto, o que pode ter influenciado nesse resultado.

Na análise de porosidade aberta, verifica-se que produziu uma argamassa com alta densificação e porosidade reduzida. Além disso, há indicações de que a presença de adições de IOT, reduziu em 22,52% a porosidade e gerou pontos de nucleação e efeito de preenchimento, acelerando as reações químicas de hidratação do cimento e as pozolânicas da sílica ativa ao longo do tempo. Isso leva ao refinamento dos poros e à redução da porosidade em idades mais avançadas [10-12]. Para a análise de quantitativos de poros das argamassas por meio de tratamento de imagens de MEV, a redução da quantidade de poros no rejeito, 10,12%, pode ser atribuída às suas partículas finas, que promovem um empacotamento mais denso das partículas. Isso, por sua vez, facilita a atuação das partículas como pontos de nucleação para a precipitação e crescimento dos cristais durante o processo de cimentação das partículas de rejeito de minério de ferro. Esse fenômeno está alinhado com a análise da porosidade aberta. Para a análise do quantitativo de poros das pastas, o rejeito apresentou um valor baixo, entretanto, 22,42% superior a argamassa REF. Um motivo para o aumento do quantitativo de poros da pasta de IOT, pode ser devido ao erro de análises das imagens e tratamentos pelo software Image J. Mas em ambos os casos, as pastas apresentaram uma baixa porosidade.

Para a emissão de CO₂ considerou para o rejeito de minério de ferro, 0.004587 kg de CO₂-eq/kg [23-26], para a sílica ativa 0.00031 kg de CO₂-eq/kg, água 0.0003 kg de CO₂-eq/kg e superplastificante 0.75 kg de CO₂-eq/kg, agregado fino 0.014 kg de CO₂-eq/kg [23]. Para a emissão de CO₂ do rejeito de minério de ferro considerou-se o processo de transporte, uma vez que é *in natura*, não precisando do processo de moagem. Assim sendo, a argamassa de IOT reduziu em 4,69% da emissão de CO₂, fazendo com que a argamassa de rejeito de minério de ferro seja mais ecológica e prejudicando menos o meio ambiente. Na tabela 3 é possível verificar todos os resultados.

Tabela 3: Resumo dos resultados das análises das argamassas

Análises	Argamassas	
	REF	IOT
Resistência à compressão	94,25 MPa	95,42 MPa
Resistência à tração na flexão	6,21 MPa	8,26 MPa
Resistividade elétrica superficial	680 kΩ.cm	833 kΩ.cm
Resistividade elétrica volumétrica	1973 Ω.m	1973 Ω.m
Porosidade aberta	2,12 %	1,64 %
Poros – MEV argamassa	1,68 %	1,51 %
Poros – MEV pastas	1,65 %	2,02 %
Emissão de CO ₂	482,28 CO ₂ -eq/kg	460,66 CO ₂ -eq/kg

5. Conclusão

Este estudo apresentou que ao utilizar o rejeito de minério de ferro *in natura* como adição mineral, por meio do empacotamento de partículas pode gerar argamassas estruturais de alto desempenho e ecológico. Estas melhorias incluem a maximização das resistências à compressão (95,42 MPa) e à tração na flexão (8,26 MPa), além do aumento da durabilidade. Após 112 dias de cura, as propriedades mecânicas revelaram valores elevados de resistividade elétrica superficial (833 kΩ.cm) e volumétrica (1.973 Ω.m). Esses resultados são atribuídos à melhor

ancoragem das partículas nas pastas de cimento, influenciada pela sílica ativa como material pozolânico, à nucleação promovida pela adição de IOT, que potencializa a hidratação dos compostos cimentícios, ao empacotamento mais eficiente das partículas do rejeito de minério de ferro e a uma baixa relação água/cimento (0,375).

As características dos materiais e o processo de empacotamento gerou argamassas com alta densificação e reduzida porosidade (menor que 2,2% nas três análises diferentes de porosidade - porosidade aberta, quantitativos de poros por meio de MEV da argamassa e pasta), uma vez que os valores foram bem baixos. A argamassa de IOT reduziu em 4,69% da emissão de CO₂, fazendo com que a argamassa de rejeito de minério de ferro cause menos impactos negativos ao ecossistema. A principal limitação encontrada foi o baixo teor de a/c, de 0,375, pois é necessário um bom superplastificante para que a argamassa adquira a consistência adequada. Outro fator importante é controlar bem a temperatura e a umidade durante a produção das argamassas, para garantir a eficiência do baixo teor de a/c.

Foi constatado que a inclusão de rejeitos de minério de ferro *in natura* possibilitou a produção de argamassas com bom desempenho mecânico e durabilidade excepcional. Isso evidencia a viabilidade de alcançar elevada resistência em argamassas por meio dessa adição mineral. Assim como também é possível reduzir a emissão de CO₂ para a produção destas argamassas, fazendo com que este produto seja mais ecológico e causando menos impacto ao meio ambiente. Como se utiliza o rejeito *in natura*, não são necessários tratamentos complexos, o que facilita sua produção para uso no setor da construção civil.

As seguintes sugestões são apresentadas para a continuidade do trabalho, visando avaliar o impacto de certos fatores em argamassas estruturais de alto desempenho com a adição de rejeito de minério de ferro *in natura*. Estudo das propriedades mecânicas e indicadores de durabilidade em diferentes processos de cura. Avaliação das propriedades mecânicas e durabilidade em idades mais avançadas, 180 dias e 365 dias.

Referências

- [1] UNITED STATE GEOLOGICAL SURVEY (USGS). National Minerals Information Center – Mineral Commodity Summaries, 2023. Disponível em: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/mcs2023>. Acesso em: 29/05/2023.
- [2] INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. Relatório Anual de Atividades, Janeiro à Dezembro de 2022a. Disponível em: <https://ibram.org.br/relatorios-de-atividades/>. Acesso em 29/05/2023.
- [3] CORDEIRO, L. C. A. Caracterização de rejeito de beneficiamento de minério de ferro em faixas ultrafinas antes e após tratamento térmico. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 117 p., 2014.
- [4] LUO, L.; LI, K.; FU, W. et al. Preparation, characteristics and mechanisms of the composite sintered bricks produced from shale, sewage sludge, coal gangue powder and iron ore tailings. **Construction and Building Materials**. v. 232, p. 117250, jan. 2020.
- [5] CANCIO, A, S.; COELHO, J, R, C.; DUARTE, M. et al. Study of the Reuse of Iron Ore Tailing in Cementitious Compounds. **International Journal of Science and Engineering Investigations**. v. 7, n. 77, p. 77, jun. 2018.

- [6] APAZA, F. R.; GUIMARÃES, A. C. R.; VIVONI, A. M. et al. Evaluation of the performance of iron ore waste as potential recycled aggregate for micro-surfacing type cold asphalt mixtures. *Construction And Building Materials*. v. 266, p. 121020, jan. 2021.
- [7] MORAIS, C.F.; BELO, B.R.; BEZERRA, A.C.S et al. Thermal and mechanical analyses of colored mortars produced using Brazilian iron ore tailings. **Construction and Building Materials**. v. 268, p. 121073, jan. 2021.
- [8] CARRASCO, E. V. M., MAGALHÃES, M. D. C., SANTOS, W. J. D., ALVES, R. C., MANTILLA, J. N. Characterization of mortars with iron ore tailings using destructive and nondestructive tests. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 31–38, 2017.
- [9] CASTRO, N. L. B. de.; ALMADA, B. S.; FAJARDO, A. A. et al. Influence of Addition Contents of Iron Ore Tailings on Structural Mortar. **Journal of Management and Sustainability**. v. 11, n. 1, p. 74, 2021.
- [10] ALMADA, B. S. et al. Evaluation of the microstructure and micromechanics properties of structural mortars with addition of iron ore tailings. **Journal of building engineering**. v. 63, p. 105405, 2023.
- [11] DUARTE, M. S. Influence of mechanical treatment and magnetic separation on the performance of iron ore tailings as supplementary cementitious material. **Journal of building engineering**, v. 59, p. 105099, 2022.
- [12] ALMADA, B. S. et al. Study of mechanical, durability and microstructural properties of cementitious composite with addition of different iron ore tailings from Brazil. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 18, p. 1947–1962, 2022.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS: **ABNT NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do índice de consistência, Rio de Janeiro, 2016.
- [14] COMITÉ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. **NP EN 12390-3**: Ensaio de Concreto Endurecido – Resistência à compressão dos corpos de prova de ensaio, Portugal, 2009.
- [15] ____ **ABNT NBR 12142**: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de provas prismáticos, Rio de Janeiro, 2010.
- [16] ____ **ABNT NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, Rio de Janeiro, 2005.
- [17] ____ **ABNT NBR 9204**: Concreto endurecido — Determinação da resistividade elétrico-volumétrica — Método de ensaio, Rio de Janeiro, 2012.
- [18] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G57**: Standard Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method. West Conshohocken, 2006. 5p.
- [19] BEZERRA, C. G.; ROCHA, C. A. A.; SIQUEIRA, I. S. et al. Feasibility of iron-rich ore tailing as supplementary cementitious material in cement pastes. **Construction and Building Materials**, v. 303, p. 124496-10, out. 2021.
- [20] XIONG, C., LI, W., JIANG, L., WANG, W., GUO, Q. Use of grounded iron ore tailings (GIOTs) and BaCO₃ to improve sulfate resistance of pastes. **Construction and Building Materials**, v. 150, p. 66–76, 2017.

- [21] WOSNIACK, L. M. et al. Resistividade elétrica do concreto pelo ensaio de migração de cloretos: comparação com o método dos quatro eletrodos. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 3, p. 321–340, 2021.
- [22] MEDEIROS-JUNIOR, R. A. et al. Investigação da resistência à compressão e da resistividade elétrica de concretos com diferentes tipos de cimento. **Revista ALCONPAT**, v. 4, n. 2, p. 113–128, 2014.
- [23] LAYSSI, H. et al. Electrical resistivity of concrete. **Concrete International**, v. 37, n. 5, p. 41–46, 2015.
- [24] HORNBOSTEL, K.; LARSEN, C. K.; GEIKER, M. R. Relationship between concrete resistivity and corrosion rate - A literature review. **Cement and Concrete Composites**, v. 39, p. 60–72, 2013.
- [25] HABERT, G. et al. Lowering the global warming impact of bridge rehabilitations by using Ultra High Performance Fibre Reinforced Concretes. **Cement and Concrete Composites**, v. 38, p. 1–11, 2013.
- [26] AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO: TP 95**. Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. 2014.
- [27] BALESTRA, C. E. T., et al. Evaluation of chloride ion penetration through concrete surface electrical resistivity of field naturally degraded structures present in marine environment. **Construction and Building Materials**, 230, 116979. 2020.
- [28] LING, G.; SHUI, Z.; GAO, X.; SUN, T.; YU, R.; LI, X. Utilizing Iron Ore Tailing as Cementitious Material for Eco-Friendly Design of Ultra-High Performance Concrete (UHPC). **Materials**, vol. 14, no. 8, p. 1829, Abr. 2021.

Parceria Brasil-China: Diretrizes e Desafios na Implementação de Corredores Verdes

Brazil-China Partnership: Guidelines and Challenges in Implementing Green Corridors

Rafael Ferraz dos Santos, Mestrando em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Rio de Janeiro - Programa de Engenharia de Transportes - PET, COPPE-UFRJ

rafael.ferraz@pet.coppe.ufrj.br

Victor Hugo Souza de Abreu, Doutor em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Rio de Janeiro - Programa de Engenharia de Transportes - PET, COPPE-UFRJ

victor@pet.coppe.ufrj.br

Resumo

O aumento no consumo de energia e a demanda por mobilidade resultaram em aproximadamente um quarto das emissões globais de CO₂ vindas do setor de transporte, com o transporte rodoviário liderando esse crescimento. As emissões têm aumentado a uma taxa anual de cerca de 2%. Neste contexto, os Corredores Verdes são essenciais, pois melhoram o microclima e integram a infraestrutura urbana sustentável. Este estudo revisa a importância desses corredores, destacando boas práticas e desafios, especialmente no contexto Brasil-China. A escolha desse foco se deve à significativa relação comercial do Brasil com a China, destacando-se na América Latina.

Palavras-chave: Corredores Verdes; Transporte Sustentável; Geopolítica Ambiental; Infraestrutura Urbana

Abstract

The increase in energy consumption and mobility demand has resulted in approximately one-quarter of global CO₂ emissions coming from the transportation sector, with road transport leading this growth. Emissions have been increasing at an annual rate of about 2%. In this context, Green Corridors are essential as they improve the microclimate and integrate sustainable urban infrastructure. This study reviews the importance of these corridors, highlighting best practices and challenges, particularly in the Brazil-China context. This focus is chosen due to Brazil's significant trade relationship with China, standing out in Latin America.

Keywords: Green Corridors; Sustainable Transport; Environmental Geopolitics; Urban Infrastructure

1. Introdução

A relação comercial entre Brasil e China teve início oficialmente em 1978, no entanto, as relações se intensificaram em 2001, após a entrada da China na Organização Mundial do Comércio (OMC). A necessidade de recursos naturais essenciais para sustentar sua alta taxa de crescimento econômico levou o país asiático a consolidar uma rede internacional de suprimento de matéria-prima [01]. Em 2009, tornou-se o maior parceiro comercial do Brasil, sendo o principal destino das exportações brasileiras [02].

Em termos gerais, os dados revelam um aumento expressivo na participação da América Latina no valor das importações chinesas, passando de 1,92% para 7% entre 2000 e 2018, com 54,12% dessas importações sendo provenientes do Brasil. Essas importações estão focadas em algumas commodities-chave, como soja, minério de ferro e petróleo [03]. O exemplo da soja é particularmente significativo, pois, enquanto a China é a principal importadora dessa commodity, o Brasil viu sua produção de soja triplicar entre 2000 e 2018, com cerca de 65% sendo destinados à exportação [04].

No Brasil, caminhões transportam 67% da produção de soja em grão [05], sendo a região Centro-Oeste do país a principal produtora. Isso implica em um percurso de aproximadamente 2.000 quilômetros das fazendas até os portos [04]. Contrariando a percepção mais comum, os padrões ambientais adotados pelos grupos industriais chineses atualmente se destacam como alguns dos mais exigentes do mundo [06]. Desta forma, torna-se imperativo para o Brasil identificar e adotar opções de transporte, bem como toda a infraestrutura do setor, que sejam tanto economicamente quanto ecologicamente sustentáveis.

Corredores verdes, também chamados corredores ecológicos, são ecossistemas naturais ou seminaturais que garantem a manutenção das populações biológicas e a conectividade entre as áreas protegidas [07]. Segundo o DNIT, a concepção de corredores ecológicos representa uma mudança radical na estratégia voltada para a conservação da biodiversidade. Anteriormente, enfatizava-se a necessidade da criação de áreas protegidas e isoladas, imunes à ação humana, entretanto, no intuito de preservar, o isolamento dos habitats gerava um resultado oposto [08]. As rodovias são responsáveis por diversos dos impactos ambientais, incluindo a fragmentação de habitats de várias espécies e a formação de barreiras com sua passagem, o que resulta na subdivisão de populações e ecossistemas, além dos atropelamentos que também constituem uma preocupação relevante [09].

Diante desse panorama de crescimento progressivo nas relações comerciais entre China e Brasil, aliado à predominância do transporte rodoviário na logística interna brasileira, à crescente relevância do país asiático em fontes alternativas de mobilidade ambientalmente mais sustentáveis, e à capacidade singular do Brasil de absorver esse capital verde, este artigo visa realizar uma análise no processo de implementação de corredores verdes em ambos os países. Pretende-se colocar em perspectiva boas práticas e desafios, além de propor alternativas viáveis de cooperação.

2. Metodologia

A metodologia deste estudo é estruturada considerando os passos apresentados no Quadro 1.

Quadro 1: Metodologia de revisão.

Revisão Documental sobre Corredores Verdes e Infraestrutura Urbana Sustentável, com Ênfase no Contexto Brasil-China
<p>Definição do Escopo da Revisão Documental:</p> <ul style="list-style-type: none"> · Estabelecimento claro dos objetivos e questões de pesquisa. · Delimitação do período de análise e das fontes documentais a serem consultadas.
<p>Levantamento Bibliográfico e Documental:</p> <ul style="list-style-type: none"> · Identificação de literatura científica, relatórios técnicos, documentos governamentais, artigos, e outros materiais relevantes sobre Corredores Verdes, infraestrutura urbana sustentável, e relações Brasil-China. · Utilização de bases de dados acadêmicas, bibliotecas digitais, portais governamentais, e outras fontes confiáveis.
<p>Seleção de Fontes e Critérios de Inclusão:</p> <ul style="list-style-type: none"> · Estabelecimento de critérios de inclusão, como relevância para os objetivos da pesquisa, atualidade, credibilidade das fontes, e enfoque nos contextos brasileiro e chinês. · Triagem inicial dos documentos de acordo com os critérios estabelecidos.
<p>Análise e Síntese da Literatura Seleccionada:</p> <ul style="list-style-type: none"> · Leitura crítica e análise dos documentos selecionados, destacando informações relevantes sobre Corredores Verdes, infraestrutura urbana sustentável, boas práticas, desafios, e relações Brasil-China. · Identificação de padrões, lacunas de conhecimento e tendências emergentes.
<p>Estruturação da Revisão Documental:</p> <ul style="list-style-type: none"> · Organização do conteúdo de acordo com temas principais, como conceitos e definições de Corredores Verdes, benefícios para a sustentabilidade urbana, casos de sucesso, obstáculos e oportunidades, e cooperação Brasil-China. · Utilização de ferramentas como mapas conceituais ou quadros sinópticos para visualização da informação.
<p>Síntese e Discussão dos Resultados:</p> <ul style="list-style-type: none"> · Apresentação das principais descobertas, destacando insights relevantes e contribuições para a compreensão do tema. · Discussão crítica das evidências, contextualizando-as no panorama mais amplo da sustentabilidade urbana e das relações internacionais entre Brasil e China.
<p>Redação do Relatório Final:</p> <ul style="list-style-type: none"> · Organização coerente e clara do conteúdo, seguindo uma estrutura lógica e sequencial. · Uso de referências bibliográficas adequadas e normatizadas, garantindo a credibilidade e rastreabilidade das fontes utilizadas. · Revisão cuidadosa do texto para garantir precisão, clareza e coesão.

Fonte: Autores.

3. A Importância dos Corredores Verdes

Os chamados corredores verdes representam uma abordagem para o transporte combinando viabilidade econômica e logística com preocupações ambientais [10]. Desde sua concepção,

esses corredores têm sido reconhecidos como uma ferramenta política e estratégica de grande relevância, promovendo a sustentabilidade ambiental no setor de transporte ao favorecer modos mais ecologicamente corretos [11].

O Brasil, detentor de uma das maiores biodiversidades do planeta e vastas áreas agricultáveis, atribui enorme importância ao princípio da proteção da biodiversidade. Essa salvaguarda é essencial não apenas pelo seu valor ecológico intrínseco, mas também pela sua relevância para a qualidade de vida saudável e até mesmo para a sobrevivência da humanidade. Em contrapartida, segundo o Relatório de Avaliação Global sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos de 2019, 1 milhão das 8 milhões de espécies estimadas na Terra estão ameaçadas de extinção [12].

Diante dessa problemática, em um contexto de multilateralismo progressivo e fortalecimento crescente de grupos como BRICS e G20, nos quais China e Brasil desempenham papéis significativos, torna-se evidente que a definição e implementação de metas para mitigar os impactos ambientais e desenvolver uma infraestrutura urbana sustentável, especialmente no setor de transporte, não podem ser atribuídas exclusivamente a um único ator global. Essa busca por integração está intimamente alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), visando um desenvolvimento global mais equilibrado até 2030. Com o surgimento e o fortalecimento de grupos como BRICS e G20, nos quais China e Brasil desempenham papéis significativos, o objetivo 17, "Parcerias para a Implementação dos Objetivos", adquire novos contornos.

Em meio a essa questão, as estradas e rodovias representam uma ameaça significativa para o ecossistema. A fragmentação de habitats, a dispersão de espécies e a perda da fauna devido a atropelamentos são apenas alguns dos danos provocados [13; 14]. Com fluxo cada vez mais intenso e da necessidade de construção de novas vias para atender demandas emergentes, a urgência de repensar a maneira como esse progresso ocorre está se tornando uma pauta cada vez mais central [04].

Nesse contexto, é essencial que sejam adotadas medidas específicas para mitigar os impactos das estradas e rodovias no meio ambiente. Isso inclui a implementação de técnicas de planejamento e construção que minimizem a fragmentação de habitats, como a criação de passagens de fauna e a utilização de cercas amigáveis à vida selvagem. Além disso, políticas de gestão e monitoramento ambiental eficazes são fundamentais para garantir a preservação da biodiversidade e o desenvolvimento sustentável das áreas afetadas pela expansão da infraestrutura viária. Essas ações não apenas protegem os ecossistemas naturais, mas também contribuem para o bem-estar das comunidades humanas que dependem desses recursos naturais para sua subsistência e qualidade de vida.

Um aspecto crucial a ser considerado é o papel dos governos e das organizações internacionais na promoção de práticas sustentáveis no setor de transporte. Incentivos fiscais para veículos de baixa emissão, subsídios para o desenvolvimento de tecnologias limpas e investimentos em pesquisa e desenvolvimento de infraestrutura verde são algumas das medidas que podem ser adotadas para impulsionar a transição para um sistema de transporte mais sustentável. Além disso, a colaboração entre diferentes setores da sociedade, incluindo empresas, ONGs e comunidades locais, é essencial para identificar soluções inovadoras e implementar políticas eficazes de proteção ambiental.

Outro ponto importante é a necessidade de uma abordagem integrada para o planejamento urbano e regional, considerando não apenas os aspectos econômicos e logísticos, mas também os impactos ambientais e sociais das infraestruturas de transporte. Isso requer a participação

ativa de todas as partes interessadas na tomada de decisões, a fim de garantir que as políticas adotadas sejam equitativas, sustentáveis e socialmente responsáveis. A promoção da participação pública e da transparência nos processos de planejamento e tomada de decisão é fundamental para garantir que as necessidades e preocupações das comunidades locais sejam devidamente consideradas e integradas às políticas de desenvolvimento urbano e regional.

4. Boas Práticas e Desafios

Claramente, a melhor maneira de minimizar o efeito negativo das estradas no meio ambiente é evitar construí-las em corredores de vida selvagem. No entanto, em uma abordagem mais pragmática, existem outras medidas que podem ser adotadas para reduzir os impactos [15], conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2: Impactos das rodovias na vida selvagem e como minimizá-los.

Impacto	Como minimizá-lo
A iluminação artificial interfere nos ciclos naturais de luz dos organismos, afetando a vida selvagem e seus padrões de comportamento.	Deve-se minimizar a iluminação artificial em estradas, pois interfere nos ciclos naturais de luz dos organismos. Se necessário, seguir diretrizes como usar iluminação fraca, desligar quando não estiver em uso, evitar luz azul e direcionar a luz apenas onde necessário pode reduzir o impacto na vida selvagem [16].
Altas velocidades aumentam o risco de atropelamento de animais e prejudicam a segurança da fauna local.	Deve-se reduzir a velocidade dos veículos em estradas dentro dos corredores, usando dispositivos de acalmia de tráfego (curvas e lombadas) e instalação placas de sinalização [17]. Além disso, limitar o tamanho e os tipos de veículos permitidos nas estradas e considerar o fechamento temporário das estradas durante períodos críticos de reprodução e dispersão da fauna [18].
Estradas ao nível natural do terreno aumentam o risco de atropelamentos de animais.	Deve-se elevar a base da rodovia acima do terreno circundante para minimizar os atropelamentos de animais e os direcionar para estruturas de travessia. Estudos mostram que vertebrados têm 93% menos chance de serem atropelados em trechos de rodovias elevadas em relação aos segmentos ao nível natural do terreno [17].
A falta de habitat adequado nas proximidades das estruturas de travessia pode impedir que a vida selvagem utilize essas passagens seguras.	Deve-se realizar a manutenção de um habitat adequado em ambos os lados das estruturas de cruzamento da rodovia. Se aplica tanto às escalas local quanto paisagística. Na escala local, a cobertura vegetal deve estar presente perto das entradas para proporcionar segurança aos animais e reduzir os efeitos negativos da iluminação e do ruído. Na escala paisagística, para espécies focais importantes, pode ser importante gerenciar a vegetação, o uso da terra e o comportamento humano para garantir que os indivíduos dos centros populacionais próximos possam alcançar a estrutura [19].

<p>Ausência e má colocação de cercas que protejam a vida selvagem</p>	<p>Deve-se implementar cercas projetadas especificamente para serem amigáveis à vida selvagem é uma estratégia eficaz para mitigar o impacto negativo das estradas na fauna local. Essas cercas não apenas impedem a entrada direta de animais nas rodovias, mas também direcionam sua movimentação para passagens seguras, como túneis de fauna ou passarelas elevadas. Essas estruturas são essenciais para conectar habitats fragmentados e reduzir os riscos de colisões entre veículos e animais, contribuindo assim para a preservação da biodiversidade e para a segurança viária. Além disso, a escolha de materiais e a configuração das cercas devem ser cuidadosamente planejadas para garantir a eficácia sem causar danos adicionais ao ecossistema local [20].</p>
<p>O ruído gerado pelo tráfego rodoviário pode perturbar a vida selvagem, interferindo em suas comunicações, padrões de comportamento e até mesmo afetando sua saúde física e mental.</p>	<p>Reduzir a velocidade dos veículos é uma medida crucial para minimizar os efeitos da poluição sonora na fauna, uma vez que veículos em alta velocidade tendem a gerar mais ruído. Além disso, a implementação de barreiras acústicas ao longo das estradas pode ajudar a bloquear e dispersar o som do tráfego, reduzindo assim a exposição da vida selvagem a níveis elevados de ruído. Complementarmente, o uso de revestimentos de pavimento que absorvam o som pode contribuir significativamente para a diminuição dos impactos sonoros nas áreas adjacentes às estradas. Essas medidas não apenas minimizam o estresse e a perturbação das espécies animais, mas também ajudam a preservar a integridade dos ecossistemas, promovendo um ambiente mais saudável e equilibrado para a vida selvagem coexistir com as atividades humanas.</p>
<p>O tráfego rodoviário também contribui para a poluição do ar e da água, o que pode ter efeitos adversos sobre a vida selvagem, incluindo contaminação de habitats aquáticos e impactos na qualidade do ar.</p>	<p>Promover práticas de condução sustentáveis é fundamental para reduzir os impactos da poluição do ar e da água na fauna. Além do uso de veículos elétricos ou de combustíveis limpos, medidas como o incentivo ao transporte público, o compartilhamento de veículos e a promoção de alternativas de mobilidade ativa, como caminhadas e ciclismo, também desempenham um papel crucial na redução das emissões de poluentes atmosféricos. Além disso, a implementação de sistemas de drenagem e tratamento de águas pluviais é essencial para prevenir a contaminação de corpos d'água naturais por substâncias químicas provenientes das estradas, como óleos, metais pesados e produtos de degradação de pneus. Essas práticas não apenas ajudam a proteger a qualidade da água e a saúde dos ecossistemas aquáticos, mas também contribuem para a conservação da fauna, garantindo um ambiente mais saudável e sustentável para as espécies silvestres.</p>

Fonte: Autores.

As medidas mencionadas no Quadro 2, provenientes de pesquisas e amplo debate, refletem a preocupação da comunidade científica em promover uma coexistência harmoniosa entre diferentes formas de vida, fundamental para o desenvolvimento sustentável, seja por meio de estradas ou qualquer outra infraestrutura urbana. No entanto, além das ações e recomendações gerais, existem aquelas mais específicas, voltadas para implementação local, que também merecem destaque.

Na região de Hong Kong, por exemplo, Wang et al. [21] conduziu um estudo para investigar os efeitos das rodovias e ferrovias sobre os insetos polinizadores em áreas suburbanas, além de propor estratégias para melhorar o planejamento e o design dessas infraestruturas, com o objetivo de aumentar a biodiversidade de polinizadores. Essas estruturas têm impactos adversos que incluem a segmentação e perda de habitat, atropelamentos de animais nas estradas e possíveis efeitos de poluição do ar causados pelos veículos.

Parte desse esforço é impulsionada pela constatação de uma diferença significativa na composição de espécies entre os lados opostos das estradas, evidenciando a fragmentação das populações de insetos voadores [22]. Em particular, voar sobre a rodovia não apenas se torna perigoso, mas também não é lucrativo, já que os polinizadores podem não detectar aromas florais fortes do outro lado da rodovia. Um corredor de aromas ou odores é fundamentalmente importante para polinizadores como as abelhas encontrarem alimentos, o que, por sua vez, ajuda na polinização cruzada das plantas.

O processo beneficia tanto a abundância quanto a diversidade dos polinizadores, bem como das plantas [23]. O uso de corredores verdes na passagem elevada da rodovia pode melhorar significativamente a conectividade dos aromas florais, especialmente quando plantas com flores também são introduzidas próximas à rodovia. Acredita-se que o uso de uma combinação adequada de espécies vegetais e características de engenharia adequadamente projetadas ajudará a melhorar a conectividade do habitat dos insetos polinizadores, assim melhorando a resiliência da biodiversidade de polinizadores em declínio [21].

Já no Brasil, em pesquisa conduzida por De Souza et al. [24] nas proximidades do perímetro urbano de Itaara/RS revelou que a incidência mais alta de atropelamentos ocorre em áreas com maior velocidade, ressaltando a importância de infraestruturas para a passagem segura da fauna, como túneis e viadutos, além da necessidade de implementação de sinalização adequada em trechos mais vulneráveis e, sobretudo, programas de conscientização para os motoristas [25]. Entre os variados tipos de corredores ecológicos, merecem destaque os modelos de passagens inferiores, superiores e ecodutos.

Notavelmente, as passagens inferiores são as estruturas mais utilizadas nas rodovias brasileiras. Para sua boa funcionalidade é essencial que estes corredores estejam localizados nos caminhos preferenciais das rotas de fauna, sendo necessário um diagnóstico prévio [26]. Por fim, destaca-se uma ferramenta desenvolvida pelo Centro Brasileiro de Estudos em Ecologia de Estradas (CBEE), conhecida como Sistema Urubu. Este aplicativo foi concebido para mapear e catalogar dados sobre atropelamentos envolvendo a fauna de vertebrados. Sua finalidade primordial é compilar informações e contribuir para a formulação de políticas públicas e fornecer subsídios para o planejamento de estratégias de mitigação [27].

5. Considerações Finais

À medida que a interação entre Brasil e China se intensifica, impulsionada pelo comércio e pela necessidade compartilhada de recursos, torna-se crucial abordar questões ambientais de forma colaborativa e abrangente. Os corredores verdes surgem como uma estratégia promissora para mitigar os impactos ambientais do transporte, oferecendo uma abordagem integrada que promove a biodiversidade e a conectividade entre habitats, e inserido nesta problemática, as estradas e rodovias surgem como um desafio particular, uma vez que o modal rodoviário é majoritário no que tange ao transporte de cargas para exportação. Ao revisar tanto as boas práticas quanto os desafios, fica claro que medidas simples como a redução da iluminação artificial, a diminuição da velocidade do tráfego e a implementação de passagens seguras para

a fauna podem contribuir para a mitigação dos impactos ambientais. Além dessas medidas, ações locais e projetos pioneiros vêm surgindo em diferentes regiões, incluindo Brasil e China, conforme demonstrado.

A implementação eficaz requer colaboração entre diferentes partes interessadas e uma abordagem holística do planejamento urbano e da infraestrutura de transporte. Neste contexto, a parceria entre Brasil e China pode desempenhar um papel crucial na promoção de soluções sustentáveis, aproveitando a expertise e os recursos de ambos os países. A integração de práticas bem-sucedidas e a troca de conhecimentos podem impulsionar a implementação de corredores verdes e outras iniciativas de transporte sustentável em ambas as nações. Portanto, é fundamental que governos, instituições e sociedade civil trabalhem em conjunto para enfrentar os desafios ambientais e promover um desenvolvimento urbano sustentável. Somente por meio dessa cooperação e do compromisso mútuo podemos construir um futuro mais verde e resiliente para as gerações futuras.

Referências

- [01] TROMBULAK, Stephen C.; FRISSELL, Christopher A. Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities. **Conservation biology**, v. 14, n. 1, p. 18-30, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2000.99084.x>.
- [02] DE OLIVEIRA, Henrique Altemani. Brasil-China: uma parceria predatória ou cooperativa? *Revista Tempo Do Mundo*, v. 2, n. 1, p. 143-160, 2016.
- [03] MARQUES, Tomás Costa de Azevedo; CAMPOS, Reinaldo. Uma análise do comércio bilateral Brasil-China: a deterioração dos termos de troca e o caso da soja. **Revista Tempo do Mundo**, n. 24, p. 379-402, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.38116/rtm24art13>.
- [04] PÉRA, Thiago Guilherme et al. Evaluation of green transport corridors of Brazilian soybean exports to China. **Brazilian Journal of Operations & Production Management**, v. 16, n. 3, p. 398-412, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.14488/BJOPM.2019.v16.n3.a4>.
- [05] ALMEIDA, Cleibson Aparecido de; SELEME, Robson; CARDOSO NETO, João. Rodovia Transoceânica: uma alternativa logística para o escoamento das exportações da soja brasileira com destino à China. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 51, p. 351-368, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-20032013000200008>.
- [06] CREUTZFELDT, Benjamin. Overcoming the greatest distance: China in Latin America. **New Perspectives on China's Relations with the World: National, Transnational and International**, p. 134-141, 2019. Disponível em: <https://www.e-ir.info/wp-content/uploads/2019/03/New-Perspectives-on-China's-Relations-with-the-World-E-IR.pdf#page=146>.
- [07] ARRUDA, Moacir Bueno. **Corredores Ecológicos: uma abordagem integradora de ecossistemas no Brasil**. Ibama, 2004.
- [08] CERUTTI, Gabriela Carolina Marin et al. Importância dos corredores ecológicos em rodovias-Estudo de caso de um trecho da rodovia SP-351. In: **IX Congresso Brasileiro de**

- Engenharia de Produção. Anais, Ponta Grossa-PR.** 2019. Disponível em: www.aprepro.org.br/conbrepro/2019/anais/arquivos/10102019_211026_5d9fcb4237a48.pdf.
- [09] BANDEIRA, Clarice; FLORIANO, Eduardo Pagel. Avaliação de impacto ambiental de rodovias. **Caderno Didático**, v. 8, n. 1, p. 16, 2004.
- [10] BEKTAŞ, Tolga et al. The role of operational research in green freight transportation. **European Journal of Operational Research**, v. 274, n. 3, p. 807-823, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.06.001>.
- [11] PANAGAKOS, George; PSARAFTIS, H. N.; LARSEN, A. Green corridors in freight logistics. **Technical University of Denmark (DTU)**, 2016. Disponível em: https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/127567830/GEOPAN_THESIS_05_12_16_COMPLETE.pdf.
- [12] DÍAZ, Sandra Myrna et al. The global assessment report on biodiversity and ecosystem services: Summary for policy makers. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3553579>.
- [13] SPELLERBERG, I. A. N. Ecological effects of roads and traffic: a literature review. **Global Ecology & Biogeography Letters**, v. 7, n. 5, p. 317-333, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1046/j.1466-822x.1998.00308.x>.
- [14] TROMBULAK, Stephen C.; FRISSELL, Christopher A. Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities. **Conservation biology**, v. 14, n. 1, p. 18-30, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2000.99084.x>.
- [15] GREGORY, Andrew et al. Toward best management practices for ecological corridors. **Land**, v. 10, n. 2, p. 140, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/land10020140>.
- [16] GASTON, Kevin J. et al. Impacts of artificial light at night on biological timings. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 48, p. 49-68, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110316-022745>.
- [17] KHALILIKHAH, Majid; HEASLIP, Kevin. Improvement of the performance of animal crossing warning signs. **Journal of safety research**, v. 62, p. 1-12, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2017.04.003>.
- [18] HILTY, Jodi et al. Guidelines for conserving connectivity through ecological networks and corridors. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2020.PAG.30.en>.
- [19] CLEVINGER, Anthony P.; CHRUSZCZ, Bryan; GUNSON, Kari. Drainage culverts as habitat linkages and factors affecting passage by mammals. **Journal of applied ecology**, v. 38, n. 6, p. 1340-1349, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1046/j.0021-8901.2001.00678.x>.

- [20] BARNUM, Sarah A. Identifying the best locations along highways to provide safe crossing opportunities for wildlife. **Colorado Department of Transportation. Research Branch**, 2003. Disponível em: <https://www.codot.gov/programs/research/pdfs/2003/wildlifecrossing.pdf/>.
- [21] WANG, Yuhong et al. Planning considerations of green corridors for the improvement of biodiversity resilience in suburban areas. **Journal of Infrastructure Preservation and Resilience**, v. 2, p. 1-15, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s43065-021-00023-4>.
- [22] ANDERSSON, Petter et al. Roads may act as barriers to flying insects: species composition of bees and wasps differs on two sides of a large highway. **Nature Conservation**, v. 18, p. 47-59, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3897/natureconservation.18.12314>.
- [23] REINHARD, Judith; SRINIVASAN, Mandyam V. The role of scents in honey bee foraging and recruitment. **Food exploitation by social insects: ecological, behavioral, and theoretical approaches**, v. 1, p. 165-182, 2009. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=kto_CQAAQBAJ&lpg=PA165&ots=40j3KhnyWy&dq=The%20role%20of%20scents%20in%20honeybee%20foraging%20and%20recruitment.%20Food%20exploitation%20by%20social%20insects%3A%20ecological%2C%20behavioral%2C%20and%20theoretical%20approaches%2C%201%2C%20165-182&lr&hl=pt-BR&pg=PA165#v=onepage&q&f=false.
- [24] DE SOUZA, Vinícius Ebling et al. Animais atropelados em um trecho da rodovia BR-158, região central do Rio Grande do Sul. **Disciplinarum Scientia| Naturais e Tecnológicas**, v. 18, n. 2, p. 265-276, 2017. Disponível em: <https://periodicos.ufn.edu.br/index.php/disciplinarumNT/article/view/2221>.
- [25] VIEIRA, Renan Luiz Albuquerque et al. O impacto das rodovias sobre a biodiversidade de fauna silvestre no Brasil. **Natureza online**, v. 17, n. 2, p. 063-075, 2019. Disponível em: <https://www.naturezaonline.emnuvens.com.br/revista/article/view/452>.
- [26] GAISLER, Jiří; ŘEHÁK, Zdeněk; BARTONIČKA, Tomáš. Bat casualties by road traffic (Brno-Vienna). **Acta Theriologica**, v. 54, p. 147-155, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF03193170>.
- [27] MAIA, A. C. R.; BAGER, A. Projeto Malha. **Centro Brasileiro de Estudos em Ecologia de Estradas**, v. 21, 2018. Disponível em: www.cbee.ufla.br/portal/imgs/images-CMS/publicacao/pdf/11.pdf.

Habitação de interesse social como modelo eficiente para Betim/MG

Social interest housing as an efficient design for Betim/MG

Bárbara Guimarães Gomes, Engenheira de Produção Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG.
engenheirabarbaragomes@gmail.com

Raquel Diniz Oliveira, Doutora em Engenharia Civil e Professora Adjunta, CEFET-MG.
raqueldiniz@cefetmg.br

Bruno Henrique Lourenço Camargos, Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP.
brunolourencocamargos@gmail.com

Resumo

O setor da construção civil possui grande potencial para contribuir com as metas globais de eficiência energética e sustentabilidade. Contudo, alguns empreendimentos brasileiros apresentam projetos semelhantes, independentemente do clima. Frequentemente, o custo é priorizado em detrimento do conforto térmico, especialmente na categoria de interesse social. Este artigo visa avaliar a eficiência energética de modelos de habitação social em Betim/MG, com base no LEED. Os critérios incluem localização, sustentabilidade, consumo de água e energia, materiais, qualidade do ar interno. O resultado foi classificado como *Gold* sem alterações no projeto original. Estratégias adicionais podem aprimorar o desempenho e orientar projetos similares.

Palavras-chave: Eficiência energética; Rotulagem de edifícios; LEED.

Abstract

The building sector has great potential to contribute to the global goals of energy efficiency and sustainability. However, some Brazilian developments feature similar designs, irrespective of the climate. Cost is often prioritized over thermal comfort, particularly in the social housing category. This article aims to evaluate the energy efficiency of social housing models in Betim/MG, using LEED criteria such as location, sustainability, water and energy consumption, materials, and indoor air quality. The result was classified as Gold with no changes made to the original project. Additional strategies could enhance performance and serve as guidelines for similar projects.

Keywords: Energy Efficiency; Building labeling; LEED

1. Introdução

A redução do consumo de energia e combustíveis, e a mitigação das mudanças climáticas são os principais desafios do setor da construção [1]. A Agenda 2030, definida pela reunião da Cúpula das Nações Unidas em 2015, define objetivos de desenvolvimento sustentável com a prerrogativa de transformar o mundo nos próximos anos. O seu objetivo de número treze trata exclusivamente da preocupação em tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos [2].

Neste contexto, as edificações residenciais, apresentam um papel importante em virtude da sua expressiva participação no consumo de energia e no perfil de emissões de gases de efeito estufa (GEE). Até 2050, estima-se que o uso de energia e as emissões associadas aos edifícios aumentem duas ou, possivelmente, três vezes, devido a algumas tendências como o crescimento da população, sua concentração em áreas urbanas, modificações no tamanho da família e mudanças comportamentais, entre outras [3].

No longo prazo, surge um desafio ainda maior, considerando que as edificações devem fornecer, entre outras qualidades, conforto térmico e lumínico para o desenvolvimento das atividades no ambiente, independentemente das condições climáticas externas e dos materiais de construção utilizados na envoltória. Isso deve ser alcançado priorizando um consumo reduzido de energia. Os edifícios certificados, de forma geral, podem alcançar uma redução significativa no consumo de energia e água em comparação com àqueles projetados sem este objetivo. Neste sentido, a certificação americana *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED), lançada em 1996, emerge como uma ferramenta crucial de avaliação voluntária. Essa certificação permite reconhecer e divulgar edificações energeticamente eficientes, com utilização otimizada e sustentável dos recursos naturais, além de impacto ambiental reduzido, alcançado por meio de práticas ambientalmente responsáveis ao longo de todo o ciclo de vida do edifício (incluindo a fase de projeto, construção, operação e manutenção). Isso se deve ao fato de que o LEED se fundamenta em critérios objetivos e categorizados, tornando-se reconhecido e adotado globalmente. Através de um sistema de pontuação, são considerados créditos obrigatórios (pré-requisitos) e opcionais, possibilitando alcançar classificações que variam de Certificado, Prata, Ouro a Platina, com notas que vão de um mínimo (40) a um máximo (110 pontos). Após a publicação da versão V4 em 2013, os critérios foram reforçados para ainda mais redução das emissões de CO₂ nas edificações [4].

Guo, Lee, Wang e Liu (2021) indicaram que a satisfação dos ocupantes de edifícios com certificação LEED, que em média apresentam de 25 a 30% de economia de energia, é maior em comparação com àqueles não certificados. Algumas pessoas passaram a ficar ainda mais tempo em casa depois de vivenciar a pandemia de COVID-19 devido à flexibilidade para trabalhar remotamente. Assim, os custos operacionais, a saúde e bem-estar propiciados pelas moradias passaram a ter uma relevância ainda maior [5].

Em 2023, o Brasil ocupou a quinta posição no ranking mundial de construções sustentáveis certificadas LEED. De acordo com o *Green Building Council Brasil* (GBC Brasil, 2024), houve um aumento de 9% no número de registros em comparação com o ano anterior, com destaque para o segmento residencial, que apresentou um aumento de 40%. No mesmo ano, 24% dos edifícios certificados no Brasil na categoria de novas construções alcançaram o nível mais elevado (Platina), superando a média global de empreendimentos certificados LEED Platina para novas construções, que foi de 8%. No Brasil, essa porcentagem atingiu 11,5% [6].

A literatura apresenta diversos estudos que se concentraram na aplicação do LEED em diferentes tipos de edifícios, como hospitais, escolas, escritórios, entre outros [7]. No contexto brasileiro, destaca-se o estudo realizado por Bueno e Rossignolo (2011), que se concentrou no padrão de certificação para residências [8]. Wu *et al.* (2018) abordaram a variação dos créditos regionais [9], enquanto Obata *et al.* (2019) investigaram o potencial do LEED em retratar o desempenho sustentável de edifícios [10]. Complementarmente, Sala Benites, Osmond e Rossi (2020) examinaram as limitações e potencialidades do uso da ferramenta de avaliação de sustentabilidade de bairros prevista no LEED-ND (Desenvolvimento de Bairros) para mitigar as emissões de gases de efeito estufa, especialmente no contexto de São Paulo [11]. Nesse cenário, Lima, Freitas e Azerêdo (2020) avaliaram a contribuição das certificações ambientais

habitação, tanto internacionais (BREEAM, LEED, CASBEE, HQE e DGNB) quanto nacionais (AQUA e SELO CASA AZUL), para a sustentabilidade ambiental urbana [12]. Por fim, ressalta-se o trabalho de Gregório e Peinado (2024) que analisaram a aplicação de critérios de sustentabilidade do selo Casa Azul e da certificação LEED BD+C v.4 em projetos de uma Habitação de interesse social (HIS). Ambas as certificações priorizam a etapa de elaboração de projetos, especialmente o projeto arquitetônico, com 16,67% dos critérios do LEED BD+C v.4 e 39,39% do total interferindo nesse aspecto [18].

A respeito da pontuação média alcançada pelas edificações certificadas LEED-NC (*New Construction*), diversos estudos foram conduzidos nos Estados Unidos da América (EUA) [13, 14 e 15]. Pushkar e Verbitsky (2018) analisaram 920 projetos certificados pela versão 3 (V3), identificando pontuações na faixa de 51–55 pontos (Prata) e 61–68,5 pontos (Ouro) [13], corroborando estudos prévios [9]. As categorias *Sustainable Sites* (SS), *Water Efficiency* (WE), *Indoor Air Quality* (IAQ) e *Innovation* (IN) alcançaram pontuações intermediárias (56,0–68,3% dos pontos possíveis), enquanto *Energy and Atmosphere* (EA) e *Materials and Resources* (MR) obtiveram pontuações mais baixas (30% e 41% dos pontos possíveis, respectivamente). Em um estudo subsequente, Pushkar e Verbitsky (2019) examinaram 1.598 projetos certificados Prata e Ouro pela V3, observando que a categoria EA registrou o maior aumento na pontuação, enquanto SS e *Indoor Environmental Quality* (IEQ) alcançaram pontuações intermediárias, e WE, MR e IN foram menos pontuadas [14], confirmando resultados anteriores [3]. Em outra análise realizada por Pushkar (2020) em projetos certificados pela V4, *Silver*, *Gold* e *Platinum*, constatou-se que as categorias SS e EA foram as mais bem sucedidas, WE e IEQ obtiveram pontuações médias, enquanto LT e MR foram as menos pontuadas em relação à pontuação disponível [15]. A categoria IN foi alcançada apenas em projetos Platina. Esses achados indicam empiricamente que o LEED falha em incentivar e recompensar a inovação.

Em um estudo direcionado para a cidade de Cabul, Afeganistão, as tipologias construtivas das residências foram categorizadas em quatro variações e posteriormente avaliadas em relação aos critérios da certificação LEED [3], a saber: apartamentos (*Apartment Buildings*), casas isoladas (*Detached Houses*), Casas com pátio (*Courty and Houses*) e Casas em encostas (*Houses on slopes*). Nesta pesquisa, verificou-se que os assentamentos informais, que cobrem um terço dos edifícios residenciais em Cabul, não cumprem os requisitos mínimos do sistema de certificação LEED. A maioria dos assentamentos formais também não possui os pré-requisitos e requisitos mínimos para serem candidatos à certificação LEED. De modo geral, as edificações apresentam poucas estratégias bioclimáticas e precisam melhorias relacionadas a eficiência e o consumo de energia, entre outras. Na Tabela 1 verifica-se a pontuação alcançada para cada categoria. Os itens *Location and transport* (LT) e *Integrated Process* (IP) não foram analisados por se tratar de estudo de diversas tipologias construtivas dispersas em diferentes partes da cidade.

Uma HIS refere-se a unidades habitacionais destinadas a famílias de baixa renda que não têm acesso adequado à moradia no mercado convencional, sendo essa a principal diferença entre outras edificações. Nas HIS, frequentemente são seguidos modelos padronizados que carecem de conforto e eficiência energética, uma vez que a concepção de projetos focada apenas no custo do empreendimento pode prejudicar o desempenho das edificações. No entanto, a certificação LEED oferece uma oportunidade para melhorar a eficiência energética nesses empreendimentos. Ao adotar os critérios do LEED, pode-se garantir práticas sustentáveis na construção, proporcionando espaços mais saudáveis e confortáveis para os moradores, além de trazer benefícios financeiros e ambientais a longo prazo.

Tabela 1: Média da pontuação LEED para todos as tipologias de edifícios residenciais em Cabul, Afeganistão.

Critérios	Pontuação	Casas isoladas	Casas com pátio	Casas em encostas	Apartamentos	Média de pontos
LT	16	-	-	-	-	-
IP	1	-	-	-	-	-
SS	10	7,8	10,0	0,9	10,1	7,2
WE	11	1,8	2,4	0,4	0,8	1,4
EA	33	4,3	7,4	0,5	6,1	4,6
MR	13	4,0	1,9	2,2	0,7	2,2
IAQ	16	5,1	3,8	1,7	3,6	3,6
IN	6	1,4	0,0	0,0	0,0	0,4
Regional Priority (RP)	4	1,4	0,8	0,0	0,4	0,7
Total	110	25,8	26,3	5,7	21,7	20,1

Certificado: 40–49 pontos, Prata: 50–59 pontos, Ouro: 60–79 pontos, Platina: 80+

Fonte: Sabory *et al.* (2021).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é analisar a proposta de HIS como um modelo eficiente para a cidade de Betim, em Minas Gerais.

2. Procedimentos Metodológicos

No presente estudo, a conformidade do modelo de projeto de habitação de interesse social a ser construída na cidade de Betim/MG foi avaliado em relação sistema de classificação LEED V4 de 2019 [4]. Para tanto, foram conduzidas duas etapas a saber: 1) caracterização do edifício; 2) Coleta de dados e análise dos critérios previsto na certificação LEED.

2.1. Caracterização do objeto de estudo

O objeto em estudo é uma edificação unifamiliar de dois pavimentos em fase de projeto, a ser construída em Betim, Minas Gerais (conforme Figura 1). Trata-se do projeto arquitetônico de um conjunto de habitações de interesse social, composto por 198 unidades, com área bruta a construir de 157,17m² por habitação (sendo 82,54m² no térreo e 74,63m² no segundo pavimento), como ilustrado na Figura 2a e 2b.

A edificação possui ambientes de permanência prolongada, incluindo uma sala de 38,96m² no primeiro pavimento, uma suíte de 8,26m² e dois dormitórios de 9,19m² e 7,41m², todos localizados no segundo pavimento conforme mostrado na Figura 2b. O memorial descritivo dos materiais de construção utilizados na HIS estudada está apresentado no Apêndice A, onde é indicado que a vedação vertical é composta por tijolos cerâmicos de 9x19x19cm com 8 furos quadrados, 1cm de argamassa de assentamento e 2,5cm de emboço, totalizando 14cm. Já a vedação horizontal é composta por laje pré-moldada (12cm) e telhas metálicas (0,1cm, brancas).



Figura 1: Perspectiva tridimensional da habitação unifamiliar. Fonte: Gtop, 2019 [16].

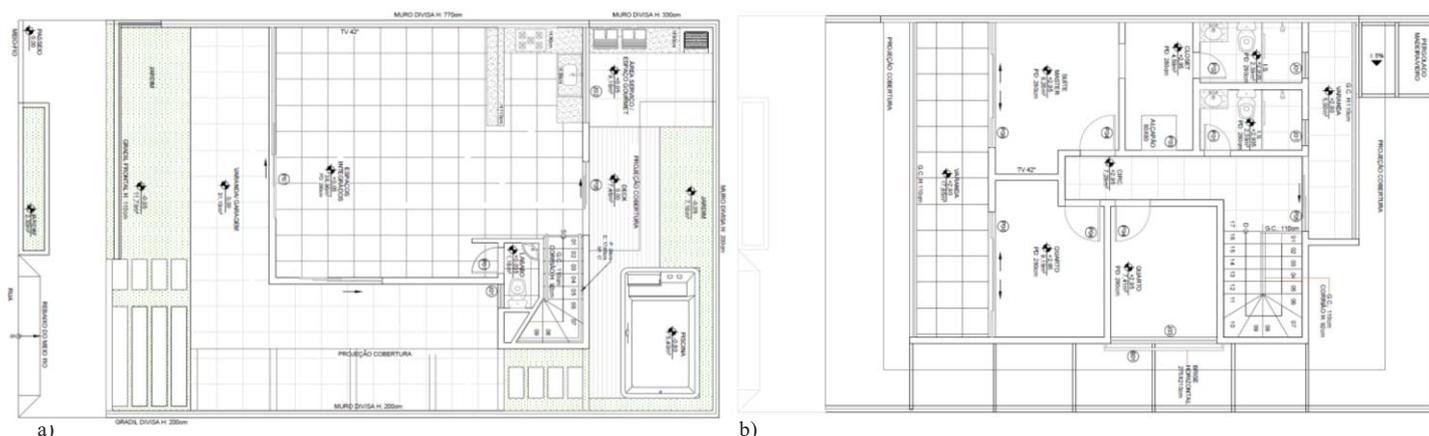


Figura 2: a) Layout do 1º. b) Layout do 2º pavimento. Fonte: Gtop, 2019 [16].

2.2. Aplicação do LEED

O referencial LEED apresenta pré-requisitos obrigatórios e créditos que geram pontuações proporcionais ao seu atendimento. Sua avaliação engloba a localização do empreendimento, o espaço sustentável, a eficiência no uso da água, a qualidade interna do ambiente, a inovação, entre outros aspectos. Embora a avaliação não atribua pesos diferentes para suas subdivisões, é importante observar que aquela com maior quantidade de itens a serem avaliados também possui maior valor [4]. Os cálculos referentes à pontuação alcançada pela edificação foram realizados manualmente para cada critério, conforme as especificidades do projeto em questão, considerando o LEED *scorecard* [17] adotado para este estudo.

3. Resultados

Os pré-requisitos exigidos para todas as categorias foram considerados atendidos tendo em vista as especificidades do projeto em análise, incluem: a utilização de materiais de baixa emissão para melhorar a qualidade do ar interior, implementação de um plano de gerenciamento de resíduos de construção para evitar o envio de resíduos para aterros, oferta de acesso ao transporte público para reduzir as emissões de GEE, uso de paisagismo eficiente e sistemas de irrigação para conservar água e cumprimento de padrões de desempenho energético para reduzir o consumo de energia e as emissões de GEE. Na Tabela 2, é apresentada uma síntese dos resultados obtidos para o estudo de caso, considerando a categoria *New Construction* do referencial LEED V4 [4], especificamente para o critério de LT.

Tabela 2. Pontuação do Estudo de Caso segundo Critérios LT do LEED.

Créditos	Pontuação prevista no referencial LEED	Pontuação obtida pelo estudo de caso	Pontuação Possível (talvez)	Pontuação impossível de ser obtida pelo estudo de caso
<i>Sensitive Land Protection</i>	1	1	0	0
<i>High Priority Site</i>	2	0	0	2
<i>Surrounding Density and Diverse Uses</i>	5	5	0	0
<i>Access to Quality Transit</i>	5	5	0	0
<i>Bicycle Facilities</i>	1	0	0	1
<i>Reduced Parking Footprint</i>	1	1	0	0
<i>Green Vehicles</i>	1	0	0	1
Total: LEED for Neighborhood Development Location	16	12	0	4

Fonte: Autores.

Como indicado na Tabela 2, concluiu-se que o bairro onde o empreendimento está localizado é pouco adensado e não apresenta impactos significativos no solo e no meio ambiente, além de oferecer fácil acesso aos meios de transporte públicos. No entanto, não há ciclovias ou veículos verdes na região. Além disso, o bairro não é classificado como "local de alta prioridade". Como resultado, o empreendimento obteve 75% da pontuação no quesito LT. Na Tabela 3, apresenta-se uma síntese dos resultados obtidos para o estudo de caso, considerando o critério de SS.

Para avaliar os Locais Sustentáveis, observou-se que a edificação em análise não faz o reaproveitamento das águas pluviais. Nesse sentido, a Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA), responsável pelo abastecimento de água da cidade, seria encarregada do manejo dessas águas por meio da rede de coleta pluvial ao longo das vias de acesso. No entanto, esse requisito poderia ser facilmente atendido com a instalação de cisternas para coletar águas pluviais, permitindo sua reutilização para irrigação do jardim ou para outros fins, como a limpeza de pisos. Outro aspecto a ser melhorado seria a ventilação interna, facilitando a adaptação às esquadrias da edificação. Esse item representa 8 pontos (somados à adaptação fácil para o reuso de águas pluviais), totalizando 80%. Neste critério, obteve-se apenas 50% dos pontos possíveis, uma pontuação abaixo da média observada por Pushkar e Verbitsky (2018) para edificações certificadas como Prata ou Ouro [13].

Tabela 3. Pontuação obtida pelo estudo de caso conforme critérios SS da certificação LEED.

Créditos	Pontuação prevista no referencial LEED	Pontuação obtida pelo estudo de caso	Pontuação Possível (talvez)	Pontuação impossível de ser obtida pelo estudo de caso
<i>Site Assessment</i>	1	1	0	0
<i>Site Development - Protect or Restore Habitat</i>	2	2	0	0
<i>Open Space</i>	1	1	0	0
<i>Rainwater Management</i>	3	0	3	0
<i>Heat Island Reduction</i>	2	0	0	2
<i>Light Pollution Reduction</i>	1	1	0	0
Total: Sustainable Sites	10	5	3	2

Fonte: Autores.

Na Tabela 4 apresenta-se uma síntese dos resultados obtidos para o estudo de caso, considerando o critério de WE.

Tabela 4. Pontuação obtida pelo estudo de caso conforme critérios WE da certificação LEED.

Créditos	Pontuação prevista no referencial LEED	Pontuação obtida pelo estudo de caso	Pontuação Possível (talvez)	Pontuação impossível de ser obtida pelo estudo de caso
<i>Outdoor Water Use Reduction</i>	2	2	0	0
<i>Indoor Water Use Reduction</i>	6	6	0	0
<i>Cooling Tower Water Use</i>	2	0	0	2
<i>Water Metering</i>	1	1	0	0
Total: Water Efficiency	11	9	0	2

Fonte: Autores.

Dada a zona bioclimática em que Betim está situada, acredita-se que o uso de uma torre de resfriamento não seria necessário. Apenas uma modificação na ventilação local seria suficiente

para atender às necessidades da edificação. Esta avaliação resultou em 9 pontos, equivalente a aproximadamente 82%, um alcance similar ao observado no estudo de Pushkar (2020) [15]. Além disso, foi observado que o empreendimento atende à demanda de seus usuários, porém não realiza compensação ambiental pelos gases gerados, tampouco utiliza fontes de energia renováveis. Dessa forma, neste quesito, foram obtidos 21 pontos, totalizando aproximadamente 64%. A envoltória da edificação está sob controle da gestão e segue metodologias estratégicas, alcançando 100% neste critério.

Os resultados obtidos para o estudo de caso, considerando o critério de EA, são apresentados na Tabela 5. Observa-se que todos os pré-requisitos foram atendidos e foi alcançado 57% dos pontos possíveis, um desempenho mais significativo em comparação ao observado por Pushkar e Verbitsky (2018) [13].

Tabela 5. Pontuação obtida pelo estudo de caso conforme critérios de EA da certificação LEED.

Créditos	Pontuação prevista no referencial LEED	Pontuação obtida pelo estudo de caso	Pontuação Possível (talvez)	Pontuação impossível de ser obtida pelo estudo de caso
<i>Enhanced Commissioning</i>	6	6	0	0
<i>Optimize Energy Performance</i>	18	11	0	0
<i>Advanced Energy Metering</i>	1	1	0	0
<i>Demand Response</i>	2	0	2	0
<i>Renewable Energy Production</i>	3	0	0	3
<i>Enhanced Refrigerant Management</i>	1	1	0	0
<i>Green Power and Carbon Offsets</i>	2	0	0	2
Total: Energy and Atmosphere	33	19	2	5

Fonte: Autores.

Os resultados obtidos para o estudo de caso, considerando o critério de MR, são apresentados na Tabela 6. Observa-se que todos os pré-requisitos foram atendidos, alcançando 31% dos pontos possíveis. Esse desempenho é mais baixo do que o observado por Pushkar e Verbitsky (2018) [13], refletindo uma pontuação similar àquela relatada por eles em 2019 [14].

Tabela 6. Pontuação obtida pelo estudo de caso conforme critérios de MR da certificação LEED.

Créditos	Pontuação prevista no referencial LEED	Pontuação obtida pelo estudo de caso	Pontuação Possível (talvez)	Pontuação impossível de ser obtida pelo estudo de caso
<i>Building Life-Cycle Impact Reduction</i>	5	0	5	0
<i>Building Product Disclosure and Optimization - Environmental Product Declarations</i>	2	0	2	0
<i>Building Product Disclosure and Optimization - Sourcing of Raw Materials</i>	2	2	0	0
<i>Building Product Disclosure and Optimization - Material Ingredients</i>	2	0	2	0
<i>Construction and Demolition Waste Management</i>	2	2	0	0
Total: Materials and Resources	13	4	9	0

Fonte: Autores.

Na Tabela 7 são apresentados os resultados obtidos para o estudo de caso, considerando o critério de IEQ. Nota-se que todos os pré-requisitos foram atendidos, alcançando quase 93% dos pontos possíveis, um desempenho superior ao relatado por estudos anteriores, que classificaram esta categoria como de médio alcance [13, 14 e 15].

Tabela 7. Pontuação obtida pelo estudo de caso conforme critérios de IEQ da certificação LEED.

Créditos	Pontuação prevista no referencial LEED	Pontuação obtida pelo estudo de caso	Pontuação Possível (talvez)	Pontuação impossível de ser obtida pelo estudo de caso
<i>Enhanced Indoor Air Quality Strategies</i>	2	2	0	0
<i>Low-Emitting Materials</i>	3	3	0	0
<i>Construction Indoor Air Quality Management Plan</i>	1	1	0	0
<i>Indoor Air Quality Assessment</i>	2	2	0	0
<i>Thermal Comfort</i>	1	1	0	0
<i>Interior Lighting</i>	2	2	0	0
<i>Daylight</i>	3	3	0	0
<i>Quality Views</i>	1	0	1	0
<i>Acoustic Performance</i>	1	1	0	0
Total: Indoor Environmental Quality	16	15	1	0

Fonte: Autores.

Os critérios de IP, IN e *Regional Priority* (RP) não foram considerados no objeto deste estudo de caso. No entanto, poderiam ser obtidos até 4 pontos no critério RP caso o projeto fosse alterado. Estudos anteriores indicaram que o critério IN foi um dos menos pontuados, sendo obtido apenas em projetos com certificação Platina [14 e 15], confirmando o pouco incentivo do LEED [17] à inovação. No geral, verificou-se a possibilidade de obtenção de 64 pontos para a edificação objeto deste estudo de caso, conforme as especificações do projeto. Assim, a edificação poderia ser certificada como *Gold* (Ouro). É importante notar que, apesar da edificação não ter sido planejada para atender aos requisitos específicos do LEED e de ser classificada como de interesse social, foi possível obter resultados acima da média em comparação com estudos prévios para casas isoladas [3] e edifícios certificados nos EUA na categoria Prata e Ouro [9 e 13]. A pontuação foi considerada para a edificação na fase de projeto. Desta maneira, caso algumas alterações possíveis fossem implementadas dentro das especificidades do projeto durante a fase de construção, a edificação poderia obter pontos adicionais (até 24 pontos), o que possibilitaria alcançar a certificação *Platinum* (Platina), com mais de 80 pontos, caso pelo menos 16 dos 24 pontos possíveis fossem obtidos.

4. Considerações Finais

As habitações de interesse social representam uma parcela significativa do ambiente construído, e seu impacto ambiental pode ser substancial. Compreender e aprimorar a eficiência energética dessas habitações é fundamental não apenas para garantir a qualidade de vida dos moradores, mas também para promover um desenvolvimento urbano mais sustentável e resiliente. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo examinar a viabilidade de uma habitação de interesse social como um modelo eficaz para a cidade de Betim, em Minas Gerais, por meio de uma abordagem centrada nos quesitos de atendimento à eficiência energética segundo a classificação LEED.

O projeto analisado se mostrou relevante como referência para edificações similares nesta localidade que objetivam alcançar maiores níveis de desempenho térmico e eficiência energética. Contudo, apesar dos bons resultados, verificou-se que a edificação não alcançou o nível máximo de eficiência conforme o LEED. No entanto, considerando que o empreendimento se encontra em fase de projeto, ainda seria possível implementar novas estratégias que resultem em melhores pontuações nestas certificações, tais como o uso aquecimento solar da água, dispositivos hidráulicos economizadores, aplicação de técnicas de reuso para águas cinzas e/ou pluviais, entre outras.

A avaliação do custo/benefício gerado com as possíveis modificações de projeto poderá contribuir para demonstrar o custo de um edifício otimizado, do ponto de vista térmico e de eficiência, em trabalhos futuros, complementando o assunto abordado.

Referências

- [1] SANTAMOURIS, M. Innovating to zero the building sector in Europe: Minimizing the energy consumption, eradication of the energy poverty and mitigating the local climate change. **Solar Energy**, 2016, v. 128, p. 61-94. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.01.021>
- [2] PNUD. PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO. **Objetivo 13**: Ação contra a mudança global do clima. Brasília, 2020. Disponível: <https://www.br.undp.org/content/brazil/pt/home/sustainable-development-goals/goal-13-climate-action.html>. Acesso: 12 mai. 2023.
- [3] SABORY, N. R.; SENJYU, T.; MOMAND, A. H.; WAQFI, H.; SABOOR, N.; MOBAREZ, R.; RAZEQI, F. LEED Scores of Residential Buildings in Poor Cities: Kabul City Case. **Sustainability** 13, n. 12, 2021, p. 69-59. <https://doi.org/10.3390/su13126959>
- [4] USGBC. UNITED STATES GREEN BUILDING COUNCIL. **LEED - Leadership in Energy and Environmental Design**: Reference guide for building design and construction. Washington: USGBC, 2019. v. 4.1.
- [5] GUO, X.; LEE, K.; WANG, Z.; LIU, S. Occupants' satisfaction with LEED- and non-LEED-certified apartments using social media data. **Building and Environment**, v. 206, 2021, p. 108288. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108288>
- [6] GBC BRASIL. GREEN BUILDING COUNCIL BRASIL. Barueri, 2024. **Conteúdo - Relatório de Atividades 2023**. Disponível: <https://www.gbcbrasil.org.br/relatorio-de-atividades-2023/>. Acesso: 12 mar. 2024.
- [7] PUSHKAR, S. Evaluating State-of-the-Art LEED-NCv4 in the U.S. **Applied Sciences**, v. 10, no. 3: 775, 2020. <https://doi.org/10.3390/app10030775>.
- [8] BUENO, C.; ROSSIGNOLO, J. A. Análise da aplicação da certificação ambiental de edificações habitacionais LEED for Homes no contexto brasileiro. **Risco: Revista de Pesquisa em Arquitetura e Urbanismo**, v. 13, 2011, p. 65-74. <https://doi.org/10.11606/issn.1984-4506.v0i13p65-74>.
- [9] WU, P.; SONG, Y.; WANG, J.; WANG, X.; ZHAO, X.; HE, Q. Regional Variations of Credits Obtained by LEED 2009 Certified Green Buildings – A Country Level Analysis. **Sustainability**, v. 10, n. 20, 2018. <https://doi.org/10.3390/su10010020>.
- [10] OBATA, S. H.; AGOSTINHO, F.; ALMEIDA, C. M. V. B.; GIANNETTI, B. F. LEED certification as booster for sustainable buildings: Insights for a Brazilian context. **Resources**,

Conservation & Recycling, v. 145, 2019, 170-178.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.037>.

[11] SALA BENITES, H.; OSMOND, P.; ROSSI, A. M. G. Developing Low-Carbon Communities with LEED-ND and Climate Tools and Policies in São Paulo, Brazil. **Journal of Urban Planning and Development**, v. 146 (2020), p. 04019025. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)UP.1943-5444.0000545](https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000545).

[12] LIMA, L. M. de; FREITAS, R.; AZERÊDO, J. As certificações ambientais habitacionais contribuem na sustentabilidade ambiental urbana? In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENCAC 20, 2021, Palmas. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2021, p. 88-97.

[13] PUSHKAR, S.; VERBITSKY, O. LEED-NCv3 Silver and Gold certified projects in the US: An observational study. **Journal of Green Building**, v. 13, 2018, p. 67–83. <https://doi.org/10.3992/1943-4618.13.2.67>.

[14] PUSHKAR, S.; VERBITSKY, O. LEED-NC 2009 Silver to Gold certified projects in the US in 2012–2017: An appropriate statistical analysis. **Journal of Green Building**, v. 14, 2019, p. 83–107. <https://doi.org/10.3992/1943-4618.14.2.83>.

[15] PUSHKAR, S. Evaluating State-of-the-Art LEED-NCv4 in the U.S. **Applied Sciences**, v. 10, no. 3, 2020, p. 775. <https://doi.org/10.3390/app10030775>.

[16] GTOP CONSTRUTORA S/A. Projeto Arquitetônico e memorial construtivo de conjunto habitacional unifamiliar de interesse social. Betim: Gtop, 2019.

[17] USGBC. Washington, 2024. LEED v4.1 Building Design +Construction - LEED v4.1 BD+C scorecard. Disponível: <https://www.usgbc.org/leed/v41#bdc>. Acesso: 05 abr. 2022.

[18] GREGORIO, A. S.; PEINADO, H. S. Estratégias projetuais para habitação de interesse social com base em requisitos de sustentabilidade ambiental. **Contribuciones a las ciencias sociales**, [S. l.], v. 17, n. 4, p. e5490, 2024. DOI: <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.4-167>

Apêndice A – Memorial Descritivo: Materiais de construção

PLANILHA DE QUANTITATIVOS - 01 UNIDADE - SOBRADO (CASA)

DESCRIÇÃO	UND	QTDE
SOBRADO – TIPO (Habitação de interesse social)		
ALVENARIAS		
ALVENARIA DE TIJOLO CERÂMICO FURADO E: 14X19X39CM - GASTA 19 TIJOLOS POR M2 - ÁREA A CONSTRUIR ALVENARIA 246.48M2 - QUANTIDADE DE TIJOLOS COM 10%	UNID	4966.00
VERGA E CONTRA-VERGA EM CONCRETO	M	45.58
ESQUADRIAS E FERRAGENS		
FORNECIMENTO E INSTALAÇÃO DOS CAIXILHOS DE ALUMÍNIO ANDORIZADO NATURAL		
CAIXILHO TIPO MAXIMAR COM 01 MÓDULO 95X60CM	UNID	3
CAIXILHO TIPO CORRER COM 02 MÓDULO 230X160CM	UNID	1
CAIXILHO TIPO CORRER COM 02 MÓDULO 245X160CM	UNID	1
PORTA ABRIR 60X210CM	UNID	1
PORTA TIPO BALCÃO 02 MÓDULOS DE CORRER 170X250CM	UNID	2
PORTA TIPO BALCÃO 02 MÓDULOS DE CORRER 290X250CM	UNID	1
PORTA TIPO BALCÃO EM L 02 MÓDULOS DE CORRER 593X255X250CM	UNID	1
FORNECIMENTO E INSTALAÇÃO DOS KITS COMPLETO, INCLUINDO INSTALAÇÃO DAS FECHADURAS E DOBRADIÇAS		
PORTA TIPO ABRIR, LISA EM MADEIRA ANGELIN, TIPO PRANCHETA 60X210CM	UNID	2
PORTA TIPO ABRIR, LISA EM MADEIRA ANGELIN, TIPO PRANCHETA 80X210CM	UNID	3
ALISAR ANGELIM 7CM	UNID	5
PEITORIL JANELA EM GRANITO BRANCO DALLAS, ESP.:2MM, CAIMENTO PARA A PARTE EXTERNA DE 3%, COM PINGADEIRA - AVANÇAR 4CM PARA FORA DO ALINHAMENTO DA PAREDE E 2.5 CM DE CADA LADO DO COMPRIMENTO PARA LANÇAR ÁGUA PARA FORA DA PAREDE	M	6.80
PORTA TIPO ABRIR, EM METALON (ALÇAPÃO) 80X80CM	UNID	1
GRADIL NYLOFOR H: 103CM, FIO 5MM, MALHA 50x200MM, L: 642CM, INCLUSIVE POSTES E GRAMPOS	M2	6.42
FORNECIMENTO DE FERRAGENS PARA ESQUADRIAS DE MADEIRA		
FECHADURA INTERNA MÉDIA CROMADA PORTAS I.S. INTERNA	UNID	2
FECHADURA INTERNA MÉDIA CROMADA PORTAS QUARTOS E SUITE INTERNA	UNID	3
JOGO DE DOBRADIÇAS INTERNAS	PÇ	5
BRISE MADEIRA		
BRISE HORIZONTAL EM MADEIRA 275X200CM, PERFIL ALETAS 4X5CM, ESPAÇAMENTO ENTRE ALETAS 10CM	UNID	1
VIDROS		
VIDRO LAMINADO 10MM, LISO, VERDE 172.5x174CM - PERGOLADO - ESPAÇO GOURMET	M2	3.15
VIDRO TEMPERADO 10MM COM PELÍCULADE SEGURANÇA, LISO, INCOLOR, PELÍCULA ADESIVA ESPELHADA 500x110CM - GUARDA-CORPO	M2	5.50
VIDRO TEMPERADO 10MM COM PELÍCULADE SEGURANÇA, LISO, INCOLOR, PELÍCULA ADESIVA ESPELHADA - 743x110CM - GUARDA-CORPO	M2	8.17
VIDRO TEMPERADO 8MM, COM PELÍCULA DE SEGURANÇA, LISO, VERDE 140x190CM - BOX BANHEIROS	UNID	2
VIDRO TEMPERADO 10MM COM PELÍCULADE SEGURANÇA, LISO, INCOLOR, PELÍCULA ADESIVA ESPELHADA - PORTAS E JANELAS	M2	27
AUTOMATIZAÇÃO		
INTERFONE COM 01 PONTOS	UNID	1
FONES DE INTERFONE	UNID	1
PISOS		
PISO EM CONCRETO, PREPARADO EM OBRA COMBETONEIRA, FCK10 MPA, SEM ARMAÇÃO, ACABAMENTO RÚSTICO, ESP.5CM, INCLUSIVE FORNECIMENTO, LANÇAMENTO, ADENSAMENTO, SARRAFEAMENTO	M2	84.28
CONTRAPISO DESEMPENADO COM ARGAMASSA, TRAÇO 1:3 (CIMENTO E AREIA), ESP. 20MM	M2	139.41
PISO PORCELANATO MÁRMORE, ESMALTADO ACETINADO, PEI 3, 60x60CM,ESPAÇAMENTO : 3MM, INTERNO - COR: BEGE SENSITIVE FENDI, ASSENTADO COM ARGAMASSA PRÉ-FABRICADA, INCLUSIVE REJUNTAMENTO NA COR: BEGE	M2	53.01
PISO CERÂMICA ESMALTADA ACETINADA, PEI 4, 60x60cm, NAVAGIO 61846 , ASSENTADO COM ARGAMASSA PRÉ-FABRICADA, INCLUSIVE REJUNTAMENTO NA COR: BEGE	M2	53.28
PISO LAMINADO, COR: CAPPUCCINO, EUCAFLOOR PRIME	M2	29.45
PISO DECK MADEIRA SINTÉTICA, INCLUSIVE FORNECIMENTO E MONTAGEM	M2	7.46
PISO DORMENTE CIMENTÍCIO PREPARADO EM OBRA	M2	5.18
SOLEIRA EM GRANITO BRANCO DALLAS	M2	2.83
PISO EM GRANITO BRANCO DALLAS DEGRAUS, ESPELHOS E PATAMARES	M2	5.13
RODAPÉ EM GRANITO BRANCO DALLAS H: 17.65CM, ASSENTADO COM ARGAMASSA PRÉ-FABRICADA, INCLUSIVE REJUNTAMENTO	M	18.20
RODAPÉ EM PORCELANATO MÁRMORE, ESMALTADO ACETINADO, PEI 3, 60x60CM, H: 15CM, INTERNO - COR: BEGE SENSITIVE FENDI, ASSENTADO COM ARGAMASSA PRÉ-FABRICADA, INCLUSIVE REJUNTAMENTO	M	34.34
RODAPÉ EM CERÂMICA ESMALTADA ACETINADA, PEI 4, 60x60cm, NAVAGIO 61846 , ASSENTADO COM ARGAMASSA PRÉ-FABRICADA, INCLUSIVE REJUNTAMENTO	M	3.80
RODAPÉ EM HPP PRIME, COR: CAPPUCCINO, ESP.7MM, H: 7CM	M	29.84
REJEUNTE PARA PISO ÁREAS SECAS, INTERNO / EXTERNO - 5Kg - COR: BEGE - PISO, RODAPÉ E SOLEIRAS - 115.00 M2 = 20KG DE REJUNTE	SC	4
ARGAMASSA COLANTE - 5K - PISO, RODAPÉ E SOLEIRAS - 115.00 M2 = 690KG ARGAMASSA	SC	138
REVESTIMENTO PAREDES E TETO		
EMBOÇO COM ARGAMASSA , CIMENTO E AREIA	M2	349.00
REBOCO COM ARGAMASSA , CIMENTO E AREIA	M2	349.00
REVESTIMENTO CERÂMICA BOLD 30X40, SLIN, BRILHANTE, COR: BRANCO, ASSENTADO COM ARGAMASSA PRÉ-FABRICADA, INCLUSIVE REJUNTAMENTO - I.S. E LAVABO	M2	26.30
REVESTIMENTO DE PAREDE 3D, 50X50CM, COR: BRANCO, ASSENTADO COM ARGAMASSA PRÉ-FABRICADA, INCLUSIVE REJUNTAMENTO – PAREDE BANCADA DE APOIO, ESPAÇO GOURMET E COZINHA	M2	23.62
GESSO LISO	M2	390.53
PERFIL "U" EM ALUMÍNIO PARA ACABAMENTO EXTERNO	M	18.20

REJEUNTE, INTERNO / EXTERNO - 5Kg - COR: BRANCO	SC	3
ARGAMASSA COLANTE - 5K - PISO, RODAPÉ E SOLEIRAS - 49.62M2 = 300KG ARGAMASSA	SC	60
PINTURAS PAREDES E TETOS		
TINTA ACRÍLICA FOSCA RENDE MUITO, 18 L, INTERNA	M2	246.48
TINTA ACRÍLICA FOSCA RENDE MUITO, 18 L, EXTERNA	M2	102.52
VERNIZ SPARLACK NEUTREX PARA MADEIRA ,3,6 L - COR: CASTANHO AVERMELHADO - SPARLACK	M2	8.19
SELADOR DE PAREDE ACRÍLICO, 18L, INTERNA/EXTERNA - SUVINIL	M2	349.00
COBERTURA		
FORNECIMENTO, FABRICAÇÃO, TRANSPORTE E MONTAGEM DE ESTRUTURA METÁLICA PARA TELHADO SOBRE LAJE PARA TELHAS METÁLICAS, INCLUSIVE PINTURA PRIMER	M2	92.30
TELHA METÁLICA TERMOACÚSTICA 16 CHAPAS, ISOLANTE EM POLIURETANO, I:10%, PINTURA ELETROSTÁTICA NA COR: BRANCO, DIMENSÕES DA COBERTURA 1155x803CM, DIMENSÕES DA CHAPA 103x570m.	M2	92.30
CUMEEIRA EM AÇO GALVANIZADO TRAPEZOIDAL 40 - L: 30CM	M	1.00
RUFO LATERAL EM AÇO GALVANIZADO	M	6.00
CALHA EM AÇO GALVANIZADO, MOLDURA PARA BEIRAL 28", 2M	M	16.06
PINTURA DOS RUFOS E CALHAS, COR: BRANCO COM TINTA ESMALTE BRILHANTE DUAS DEMÃO	M	23.06
PERGOLADO EM MADEIRA, TERÇA 6x12CM - ESPAÇO GOURMET	M	4.50
PERGOLADO EM MADEIRA, CAIBRO 5x6CM - ESPAÇO GOURMET	M	5.19
PERGOLADO EM MADEIRA, TERÇA 6x12cm - GARAGEM	M	15.00
BANCADAS, LOUÇAS, METAIS E OUTROS		
LAVATÓRIO MARAJÓ CANTO 30x30x15CM, COR: BRANCO	UNID	1
CUBA DE EMBUTIR CERÂMICA OVAL IL65 14x40x30CM - COR: BRANCO	UNID	2
VASO SANITÁRIO COM CAIXA ACOPLADA 3/6L SAÍDA VERTICAL - COR: BRANCO	UNID	3
CUBA EM INOX SIMPLES 40x34x15CM	UNID	1
TANQUE SIMPLES RETANGULAR EM AÇO INOX CROMADO 30L	UNID	1
TORNEIRA PARA PAREDE DE TANQUE E MÁQUINA DE LAVAR BICA BAIXA CROMADO PERTUTTI - DOCOL	UNID	1
TORNEIRA PARA PAREDE DE JARDIM BICA BAIXA CROMADO PRIMOR - DOCOL	UNID	2
TORNEIRA PARA PIA DE BANHEIRO BICA ALTA CROMADA PERTUTTI - DOCOL	UNID	3
TORNEIRA FECHAMENTO AUTOMÁTICO PARA PIA DE BANHEIRO CROMADO PRESSMATIC COMPACT - DOCOL	UNID	3
PISCINA NAAMA COMPACTA 300x180/80CM, INCLUSIVE INSTALAÇÃO	UNID	1
CHURRASQUEIRA DE CONCRETO REFRACTÁRIO 74CM COM COIFA PROFONGADA	UNID	1
COLUNA TORRE EM INOX H: 30CM PARA GUARDA-CORPO DE VIDRO, INCLUSIVE INSTALAÇÃO	UNID	11
TUBO DE INOX ESCOVADO D:4,4CM - FIXADO NA ALVENARIA , INSTALADO A 92CM DO CHÃO - CORRIMÃO, INCLUSIVE INSTALAÇÃO	M	6.55
TUBO DE INOX ESCOVADO D:4,4CM PARA GUARDA-CORPO, INCLUSIVE INSTALAÇÃO	M	4.15
TUBO DE INOX ESCOVADO PARA MONTANTE, D:5CM, H: 110CM - GUARDA-CORPO	M	9.90
TUBO DE INOX ESCOVADO D: 2CM - GUARDA CORPO, INCLUSIVE INSTALAÇÃO	M	29.05
ROSETA DE INOX ESCOVADO D: 4.4CM PARAFUSADO NO PISO PARA FIXAR O GUARDA-CORPO, INCLUSIVE INSTALAÇÃO	PC	9.00
CAIXA D'ÁGUA DE POLIETILENO OU EQUIVALENTE, COM TAMPAS, CAPACIDADE DE 500L, INCLUSIVE TODOS OS ITENS PARA SUA INSTALAÇÃO E FUNCIONALIDADE	UNID	2
BANCADA DE GRANITO BRANCO DALLAS 227.5x40CM, E: 3CM - BANCADA ALTA	UNID	1
BANCADA DE GRANITO BRANCO DALLAS 180x60CM, E: 3CM - COM FURO PARA FOGÃO	UNID	1
BANCADA DE GRANITO BRANCO DALLAS 100x60CM, E: 3CM - COM FURO PARA CUBA EM INOX	UNID	1
BANCADA DE GRANITO BRANCO DALLAS 60x60CM, E: 3CM	UNID	1
BANCADA DE GRANITO BRANCO DALLAS 207.5x60CM, E: 3CM - COM FURO PARA TANQUE DE INOX	UNID	1
BANCADA DE GRANITO BRANCO DALLAS 50x65CM, E: 3CM - COM FURO PARA CUBA	UNID	2
FERRAGENS COMPLETA PARA O BOX	UNID	2
CAIXA D'ÁGUA 500L	UNID	2
PAISAGISMO, URBANISMO E SERVIÇOS COMPLEMENTARES		
PLANTIO DE GRAMA ESMERALDA EM PLACAS, INCLUSIVE TERRA VEGETAL	M2	24.77

Tecnologias sustentáveis para recuperação de água e extração de ácido em efluentes de mineração de ouro: um enfoque em destilação por membranas e extração líquido-líquido para reúso

Sustainable Technologies for Water Recovery and Acid Extraction from Gold Mining Effluents: A Focus on Membrane Distillation and Liquid-Liquid Extraction for Effluent Reuse

Livia Maíra Carneiro Castro, UFMG.

liviamccastro@gmail.com

Victor Rezende Moreira, Doutor, UFMG.

victorrznde.eng@gmail.com

Miriam Cristina Santos Amaral Morávia, Doutor, UFMG.

mcsamaral@ufmg.br

Resumo

O estudo destaca a importância da implementação de práticas sustentáveis na indústria mineradora, visando maximizar o aproveitamento de recursos e minimizar o desperdício. Em específico, foi avaliado a recuperação de água e ácido sulfúrico de efluentes da mineração de ouro, visando torná-los adequados para reaproveitamento. A destilação por membrana com folga de ar (AGMD) e a extração líquido-líquido (ELL) utilizando contactores de membrana de fibra oca foram investigadas. Na AGMD, foi obtido um destilado de alta qualidade, com eficiência > 99% para a condutividade. Na ELL, o agente extrator TEHA recuperou >95% de ácido mineral. Os resultados demonstraram alta eficiência na remoção de contaminantes, proporcionando produtos de qualidade adequada para reutilização ou descarte. Essas abordagens oferecem soluções sustentáveis para o processamento de ouro, contribuindo para a conservação de recursos hídricos e a redução do impacto ambiental da mineração de ouro. Futuras pesquisas podem se concentrar no desenvolvimento de métodos para recuperação de outros elementos valiosos presentes nos efluentes, ampliando ainda mais o potencial de reúso e promovendo a sustentabilidade na mineração de ouro.

Palavras-chave: Mineração de ouro; Reúso; Efluente de mineração

Abstract

The study emphasizes the importance of implementing sustainable practices in the mining industry to maximize resource utilization and minimize waste. Specifically, the recovery of water and sulfuric acid from gold mining effluents was evaluated to make them suitable for reuse. Air-gap membrane distillation (AGMD) and liquid-liquid extraction (LLE) using hollow fiber membrane contactors were investigated. In AGMD, high-quality distillate with >99% efficiency for conductivity was obtained. In LLE, the extracting agent TEHA recovered >95% of mineral acid. Results showed high efficiency in contaminant removal, providing products of suitable quality for reuse or disposal. These approaches offer sustainable solutions for gold processing, contributing to water resource conservation and reduction of environmental impact in gold mining. Future research could focus on developing methods for recovering other valuable elements present in effluents, further expanding reuse potential and promoting sustainability in gold mining.

Keywords: Gold mining; Reuse; Membrane distillation; Mining wastewater

1. Introdução

A correta destinação dos efluentes provenientes da mineração é um problema de grande interesse para o mundo moderno, uma vez que essa atividade serve como base para setores produtivos diversos, tais quais os de transporte, infraestrutura e comunicação. Na mineração de ouro, mais especificamente, os efluentes podem derivar de um processo de oxidação sob pressão (POX), sendo ricos em água, ácido sulfúrico (pH: ~2,0) e metais críticos, como cobre (~ 250 mg/L), níquel (~ 400 mg/L) e cobalto (~ 66 mg/L) [1,2].

Nesse sentido, a partir do tratamento deste efluente, é possível não apenas torná-lo adequado para descarte, como também reduzi-lo em volume, reaproveitando substâncias comercializáveis e/ou reutilizáveis na planta mineradora. Este trabalho concentra-se, portanto, na recuperação de água e ácido sulfúrico provenientes do efluente da mineração de ouro.

No contexto da recuperação de água, a destilação por membrana com folga de ar (AGMD) apresenta-se como uma estratégia com alta eficiência energética e relativamente simples. Nessa técnica, a membrana hidrofóbica é posicionada entre uma corrente, aquecida e rica em ácido e metais, e outra corrente, resfriada aquosa. Devido à diferença de temperatura, gera-se um gradiente de pressão de vapor através da membrana (força motriz), de modo que, idealmente, apenas a água vaporizada consegue penetrar os poros e incorporar-se ao lado resfriado[3]. Em estudo anterior, a exemplo, Amaya-Vías et al. indicaram a obtenção de um destilado de alta qualidade, com eficiência > 99% para a condutividade, à taxa média de 10,16 L/m² [4,5].

Na configuração AGMD, ainda, existe um espaço de ar estagnado entre a membrana e a corrente resfriada. Isso promove uma boa eficiência energética, no entanto, prejudica o aproveitamento da força motriz gerada; de modo que a eficiência de recuperação de água precisa ser avaliada.

Para a recuperação de ácido sulfúrico, estudos anteriores exploraram o potencial da técnica de extração líquido-líquido (ELL) convencional. Nela, o efluente concentrado em ácido é disperso em uma fase orgânica (extração). Por maior solubilidade, o ácido migra para a fase orgânica e é separado. Em uma etapa posterior (reextração), a fase orgânica rica é recuperada quando dispersa em uma nova fase aquosa ácida, para a qual o H₂SO₄ é transferido. Com isso, há o empobrecimento em ácido do efluente (refinado) e o enriquecimento de uma fase aquosa à parte. Dentre resultados obtidos, o tris(2-etilhexil)amina (TEHA) foi indicado como um bom agente extrator para o ácido sulfúrico [1,6], sendo recuperados 71,7 ± 0,9% de ácido mineral através do seu uso na ELL [1].

O concentrado resultante de estudos anteriores [5,6], porém, ainda apresentou pH muito ácido, dificultando a posterior exploração do refinado para a recuperação de metais como níquel e cobalto. Para sanar essa lacuna, este trabalho visa explorar a extração líquido-líquido com contactores de membrana como uma alternativa para a recuperação de ácido sulfúrico. Nessa técnica, o contato entre as fases aquosa e orgânica se dá através dos poros de uma membrana de fibra oca [6], o que proporciona maiores área superficial e eficiência de extração. Com isso, espera-se obter um refinado em pH suficientemente elevado para recuperação de outros elementos (pH: ~ 4).

2. Procedimentos Metodológicos

2.1. Efluente da mineração de ouro e caracterizações

O efluente foi amostrado após a POX a temperaturas variando entre 60 e 80 °C, armazenado a 4°C e levado à temperatura ambiente antes dos experimentos. Todas as análises de caracterização seguiram as diretrizes descritas nos Métodos Padrão para Exame de Água e Águas Residuais [7] (método 3111 para íons metálicos, método 4500-H + para pH, métodos 4500-H + e 2310 para ácido sulfúrico, e método 2510 para condutividade). Uma representação esquemática da configuração experimental adotada para a recuperação de água e ácido sulfúrico de águas residuais da mineração de ouro é ilustrada na Figura 1.

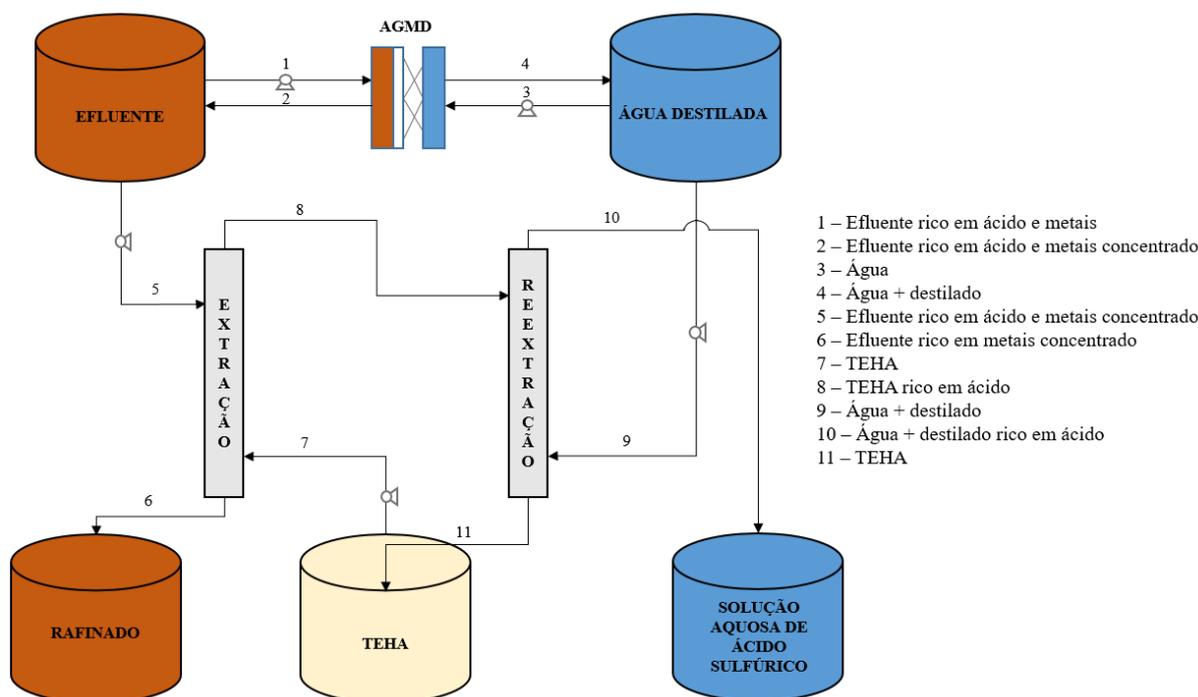


Figura 1: Reservatórios e fluxos envolvidos nas operações de destilação por membrana e extração de H₂SO₄ por solvente não dispersivo. Fonte: elaborada pelos autores.

2.2. Destilação por membrana com espaço de ar (AGMD)

Os experimentos de destilação por membrana com espaço de ar utilizaram 2 litros de efluente, a uma vazão de recirculação de 0,3 litros por minuto. As temperaturas de alimentação variaram de 40 a 60 °C. Água deionizada foi empregada como solução refrigerante, mantida a 25 °C. Não foi realizado nenhum pré-tratamento das águas residuais, a fim de avaliar o desempenho do sistema em condições semelhantes às reais. O fluxo de destilado foi estimado a partir do monitoramento dos incrementos de massa em intervalos de 2 minutos. Consolidaram-se os resultados em valores médios de massa para intervalos de 10 minutos, de modo a ser calculado o fluxo conforme a Eq. (1), onde n representa o fluxo mássico de destilado, Δm a variação de massa em um intervalo de tempo Δt e A representa a área da membrana, transversal atravessada pelo fluxo mássico. Ao todo, o sistema de destilação foi monitorado em um ensaio longo, contabilizando 3000 horas de operação, para o qual foram coletadas amostras do efluente bruto ao início, do concentrado e do destilado ao final da operação.

$$n = \frac{\Delta m}{\Delta t \cdot A} \quad (1)$$

Para os experimentos, foi selecionada uma membrana polimérica comercial [poli(tetrafluoroetileno) ou PTFE] da marca Sterlitech®, com uma área efetiva de 42,09 cm². A escolha dessa membrana levou em consideração sua disponibilidade comercial e sua adequação para aplicações piloto e em larga escala. Possui tamanho de poro de 0,2 μm, espessura de 170 μm e pressão de entrada de líquido de 3 bar.

2.3. Extração de H₂SO₄ por solvente não dispersivo (ELL com contactores de membrana)

Para a extração de H₂SO₄ utilizou-se um módulo de membrana de fibra oca de polipropileno fornecido pela Liqui-Cell™. O módulo, composto por aproximadamente 10.000 fibras com comprimento efetivo de 15 cm, operou em temperatura ambiente (25 ± 2 °C). A tris(2-etilhexil)amina (TEHA) serviu como extratante (15% em volume diluído em querosene) e foi recirculada no lado do invólucro a 4 cm³/s. Em contra-corrente, o concentrado foi recirculado no lado do lúmen a 36 cm³/s. Esta diferença de vazão garantiu um diferencial de pressão de > 0,3 bar. A reextração do ácido mineral ocorreu com água destilada, nas mesmas condições de recirculação e pressão.

Os processos de extração e reextração foram realizados de modo contínuo, ao longo de 1480 minutos, tendo sido coletadas 9 amostras de solução ácida pós-reextração ao longo do experimento.

2.4. Equipamentos

Na AGMD, foram utilizados uma balança de alta capacidade da Bel Engineering (modelo L10001, resolução de 0,1g) e um condutivímetro da Hanna Instruments (modelo HI2030, electrodo HI763100) para o acompanhamento periódico de massa e condutividade, respectivamente, do destilado. Além disso, para a alimentação, utilizaram-se o mesmo condutivímetro e um pHmetro da Hanna Instruments (modelo HI2020, electrodo HI11310) para verificação das condições de condutividade e pH.

No experimento de ELL com contactores de membrana, o pHmetro e a balança também foram empregados. Para todos os fluxos principais (efluente, destilado, concentrado e solução ácida pós reextração de H₂SO₄), empregou-se o espectrofotômetro de absorção atômica da GBC Scientific Equipment (modelo XplorAA Dual), para a determinação das concentrações de ácido sulfúrico, magnésio, manganês, ferro, cobre, níquel e cobalto. Além disso, no bombeamento das correntes ao longo dos dois sistemas trabalhados, foi utilizada a bomba peristáltica PolyCanal 2 GA 5200 MB da Provitec.

2.5. Análise Estatística

Para a análise estatística, utilizaram-se o Microsoft Excel e o OriginPro. O teste de Mann-Kendall foi empregado para identificar tendências específicas nos dados. Todas as análises foram realizadas com um nível de confiança de 95%.

3. Resultados e discussão

A Figura 2 mostra os resultados do fluxo de destilado obtidos, com um valor médio correspondente a 6,6 ± 1,8 L/m²h. Não houve tendência de decaimento do fluxo ao longo desses experimentos, como evidenciado pelo p-valor não significativo (0,221) obtido nos testes de

Mann-Kendall. Além disso, as taxas de recuperação do destilado corresponderam a 69%, limitadas dentro do intervalo de tempo experimental predeterminado e sem afetar a incrustação ou a qualidade do destilado.

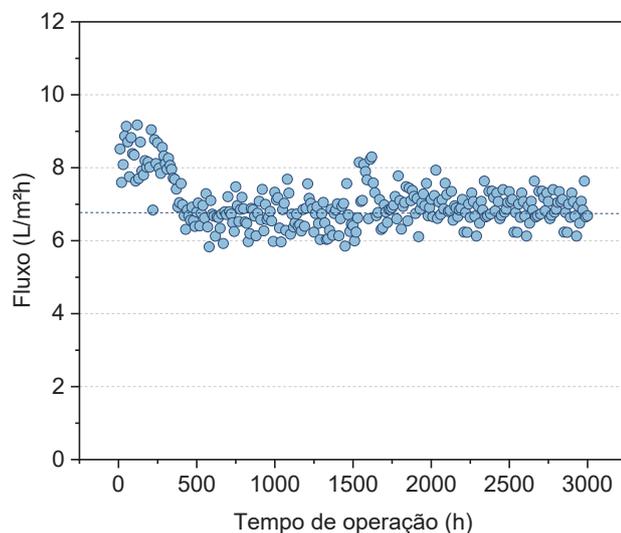


Figura 2: Fluxo do processo de destilação por membranas (valor médio: $6,6 \pm 1,8$ L/m²h). Fonte: elaborada pelos autores.

Em todos os casos, o destilado apresentou baixas concentrações de ácidos e outros contaminantes metálicos. Isso sugere a ausência de molhamento da membrana e sua adequação para reutilização em vários processos industriais ou como solução de reextração para o ácido extraído por contactores de membrana de fibra oca. A Tabela 1 ilustra as características físico-químicas do efluente bruto, destilado e a corrente de concentrado obtida após os processos de membranas. As altas rejeições observadas podem ser atribuídas ao fato de que apenas compostos voláteis podem passar pelos poros da membrana.

Tabela 1: Caracterização físico-química do efluente bruto e das correntes geradas pelo ensaio de destilação por membranas. Fonte: elaborada pelos autores.

Parâmetro	Efluente bruto	Destilado (água de reúso)	Concentrado	Solução ácida pós reextração de H ₂ SO ₄
H ₂ SO ₄ (mmol/L)	19.5 ± 3.1	<0.05	53.1	52.7 ± 1.1
Ferro (mg/L)	916.5 ± 13.0	24.4 ± 0.1	2900.5	37.1 ± 1.2
Magnésio (mg/L)	1873.1 ± 7.2	<0.5	6041.1	<0.5
Manganês (mg/L)	102.8 ± 2.5	<0.5	330.5	<0.5
Cobre (mg/L)	202.9 ± 6.3	<0.5	653.4	<0.5
Níquel (mg/L)	239.8 ± 2.1	2.5 ± 1.1	767.9	3.1 ± 0.2
Cobalto (mg/L)	35.4 ± 0.9	<0.5	111.7	<0.5

Em comparação com outros elementos, as concentrações de ferro foram mais altas. Todos os outros elementos permaneceram abaixo do limite de quantificação. A detecção desses elementos no destilado foi atribuída ao desgaste do sistema, em vez de à hipótese de molhamento, a qual foi anteriormente descartada. Se o molhamento fosse o principal fator, isso potencialmente levaria à permeação de elementos adicionais através da membrana.

A recuperação de ácido sulfúrico usando contactores de membrana de fibra oca e TEHA alcançou mais de 95% de eficiência de extração (Fig. 3). O líquido restante (refinado) tinha um pH de 3,6, próximo ao pH alvo de 4 necessário para extrair outros elementos de valor, como níquel e cobalto. Este pH mais elevado é uma melhoria em relação aos métodos tradicionais que dependem da mistura de fases aquosas e orgânicas para transferência de massa.

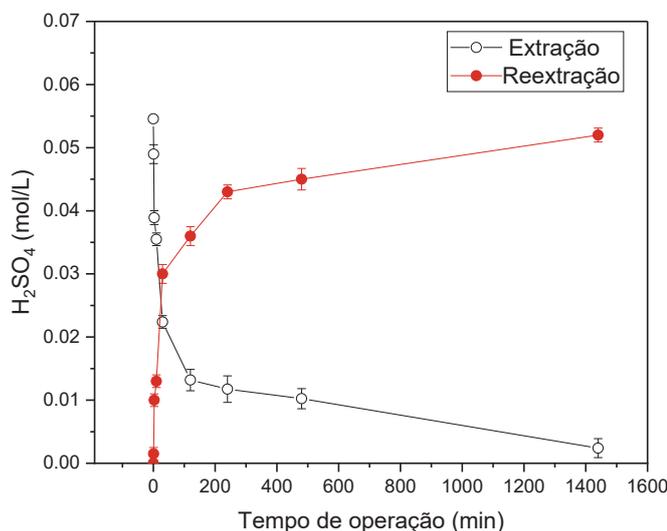


Figura 1: Perfil de concentração de H₂SO₄ durante os ensaios de extração e reextração utilizando membranas contactoras. Fonte: elaborada pelos autores.

A eficiência aprimorada observada nos contactores de membrana de fibra oca pode ser atribuída à área de superfície aumentada disponível para transferência de massa. Nos processos assistidos por membranas, a interação entre as fases orgânica e aquosa ocorre nas aberturas dos poros, diferenciando-se dos métodos convencionais onde a área de transferência de massa depende da taxa de agitação e da dispersão de uma fase na outra.

Sob a perspectiva de sustentabilidade e potencial de reutilização dos fluxos recuperados, é crucial observar que a água desempenha um papel ubíquo ao longo do processamento de ouro, desde umedecer rochas para corte/furação até formar soluções nas etapas de processamento de ouro. Somente nos Estados Unidos, o consumo de água na mineração atingiu 4000 Mgal/dia em 2015, com 72% de uso de água subterrânea e 28% de água superficial. Dada a demanda substancial de água na mineração, recuperar e reutilizar água por meio do tratamento de resíduos oferece uma solução sustentável para o processamento de ouro, minimizando o desperdício e a poluição deste recurso crucial e contribuindo para a sustentabilidade geral das atividades de mineração de ouro. Da mesma forma, o ácido sulfúrico recuperado, com baixas concentrações de impurezas (Tabela 1), pode encontrar aplicações em processos industriais externos e ser reutilizado no processamento de ouro. Em minérios contendo pirita, o ouro muitas vezes fica retido em matrizes de sulfeto. O método de oxidação sob pressão, utilizando ácido sulfúrico, mostrou-se eficaz na quebra da matriz de sulfeto e liberação do ouro.

4. Conclusão ou Considerações Finais

Este estudo demonstra que a destilação por membrana com espaço de ar e a extração líquido-líquido utilizando contactores de membrana de fibra oca são eficazes na recuperação de água e ácido sulfúrico de efluentes da mineração de ouro. Ambas as técnicas mostraram alta eficiência na remoção de contaminantes, resultando em produtos de alta qualidade adequados para reuso ou descarte. Além disso, essas abordagens oferecem soluções sustentáveis para o

processamento de ouro, contribuindo para a conservação de recursos hídricos e a redução do impacto ambiental associado à mineração de ouro. Futuras pesquisas podem se concentrar no desenvolvimento de métodos para recuperação de outros elementos valiosos presentes nos efluentes, visando a maximização da eficiência e a ampliação do potencial de reaproveitamento desses recursos.

Referências

- [1] V.R. Moreira, Y.A.R. Lebron, D. Gontijo, M.C.S. Amaral, One-step recycling of mineral acid from concentrated gold mining wastewater by high-temperature liquid–liquid extraction, *Sep Purif Technol* 286 (2022) 120447. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120447>.
- [2] V.R. Moreira, E.A. Torres, J.C. Balarini, T.L.S. Miranda, L.V.S. Santos, M.C.S. Amaral, Non-dispersive solvent extraction as an alternative for sulfuric acid and copper recycling from membrane distillation concentrate of gold mining wastewater, *Chemical Engineering Journal* 471 (2023) 144622. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144622>.
- [3] Z.S. Tai, M.H.D. Othman, K.N. Koo, W.N.F.W. Mustapa, F. Kadir Khan, Membrane innovations to tackle challenges related to flux, energy efficiency and wetting in membrane distillation: A state-of-the-art review, *Sustainable Materials and Technologies* 39 (2024) e00780. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00780>.
- [4] D. Amaya-Vías, L. Tataru, B. Herce-Sesa, J.A. López-López, J.A. López-Ramírez, Metals removal from acid mine drainage (Tinto River, SW Spain) by water gap and air gap membrane distillation, *J Memb Sci* 582 (2019) 20–29. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.03.081>.
- [5] V.R. Moreira, L.M.C. Castro, J.C. Balarini, T.L.M. Santos, M.C.S. Amaral, Recovering and reusing water, H₂SO₄, nickel and cobalt from gold mining wastewater using air-gap membrane distillation and solvent extraction, *Desalination* 580 (2024) 117525. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117525>.
- [6] V.R. Moreira, Y.A.R. Lebron, D. Gontijo, M.C.S. Amaral, Membrane distillation and dispersive solvent extraction in a closed-loop process for water, sulfuric acid and copper recycling from gold mining wastewater, *Chemical Engineering Journal* (2021) 133874. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133874>.
- [7] APHA, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23th ed.), 2017.

Perfil ambiental de edificações com os sistemas construtivos em alvenaria estrutural e em taipa de pilão

Environmental profile of buildings with structural masonry and rammed earth construction systems

Bruna da Cunha Castilho, Engenheira civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Graduação em Engenharia Civil - Campus Apucarana.

brunacastilho@alunos.utfpr.edu.br

Augusto Montor de Freitas Luiz, Mestre em engenharia civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Graduação em Engenharia Civil - Campus Apucarana.

augustom@utfpr.edu.br

Sarah Honorato Lopes da Silva Tamura, Doutora em engenharia civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Pós-Graduação em Engenharia Ambiental - Campus Apucarana.

sarahh@utfpr.edu.br

Resumo

Projetar edificações sustentáveis é essencial para reduzir impactos ao longo do ciclo de vida. Este estudo avaliou o impacto ambiental de sistemas construtivos, comparando os sistemas construtivos em alvenaria estrutural com blocos cerâmicos e em taipa de pilão, para uma habitação de interesse social (HIS). Quantificou-se materiais nas fases pré-operação e operação. Resultados indicam que a fase de pré-operação é mais relevante para ambos os sistemas. A comparação revelou que a taipa de pilão tem impactos 1,68 vezes menores que a alvenaria estrutural. Essas conclusões contribuem para a literatura nacional sobre Avaliação do Ciclo de Vida na construção civil, auxiliando nas tomadas de decisões profissionais e acadêmicas.

Palavras-chave: avaliação do ciclo de vida; construção sustentável; construção com terra

Abstract

Designing sustainable buildings is crucial for reducing impacts throughout their lifecycle. This study evaluated the environmental impact of construction systems, comparing structural masonry with ceramic blocks and rammed earth in social housing. Materials were quantified in the pre-operation and operation phases. Results indicate that the pre-operation phase is more relevant for both systems. The comparison revealed that rammed earth has 1.68 times lower impacts than masonry. These findings contribute to the national literature on Life Cycle Assessment in construction, aiding in professional and academic decision-making.

Keywords: life cycle assessment; sustainable construction; earthen building

1. Introdução

A indústria da construção civil desempenha um papel de extrema importância nas atividades econômicas e sociais de um país. No entanto, é crucial reconhecer que essa mesma indústria tem sido uma grande geradora de impactos ambientais. Diante desse cenário, torna-se imperativo buscar qualificações e técnicas mais apropriadas e vantajosas para a construção de edifícios cada vez mais sustentáveis [1, 2]. Como estratégia para mitigar os impactos no setor da construção, diversas medidas têm sido propostas. Isso inclui a exploração das condições naturais locais, a gestão sustentável da implantação da obra, a utilização de matérias-primas que promovam a ecoeficiência do processo, a minimização do consumo energético e a adoção dos princípios de reduzir, reutilizar, reciclar e dispor adequadamente dos resíduos sólidos, entre outras ações [3]. Além disso, a incorporação de novos processos, metodologias, materiais, tecnologias e métodos construtivos que incentivem práticas mais sustentáveis e competitivas tem se mostrado uma alternativa eficaz para aumentar a eficiência das construções ao longo de seu ciclo de vida [4]. Nesse sentido, nas últimas décadas as técnicas vernáculas de construção com terra (adobe, taipa de pilão, taipa de mão, COB, por exemplo) têm sido revisitadas em virtude do desempenho associado ao conforto térmico, eficiência energética e quanto a logística associada ao sistema (disponibilidade local, mínimo processamento de matéria-prima e a reciclagem e reutilização), representando uma alternativa aos sistemas construtivos correntes [5, 6, 7].

Em se tratando dos sistemas construtivos convencionais, a alvenaria estrutural com bloco cerâmico (AEC) que apresentam coordenação modular, podem proporcionar a otimização do consumo de matérias-primas e recursos energéticos na construção e, conseqüentemente, a redução de resíduos gerados. Contudo, estes sistemas tradicionais ainda empregam materiais que demandam alto gasto energético em sua cadeia produtiva, como é o caso dos ligantes aéreos e hidráulicos, aço e produtos que passaram por processo de queima. Assim, a escolha por sistemas construtivos alternativos na etapa de projeto pode ser vantajosa em termos de redução dos impactos ambientais, a exemplo da taipa de pilão (TP). No entanto, antes que novos materiais de construção civil sejam rotulados como sustentáveis, é fundamental compreender os ganhos para o setor produtivo e a redução de impactos para o meio ambiente. Nesse sentido, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) surge como uma metodologia essencial para fornecer um quadro geral de todos os aspectos ambientais e impactos potenciais associados a esses produtos durante seu ciclo de vida completo [8]. Assim, o objetivo deste estudo é avaliar os impactos ambientais dos sistemas construtivos em AEC e TP para uma residência Habitacional de Interesse Social (HIS), mediante o emprego da metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida.

2. Procedimentos Metodológicos

O estudo de caso foi conduzido em uma residência térrea de 51 m² projetada para atender às demandas das HISs e o desempenho de uma construção tradicional dentro do contexto brasileiro. A avaliação dos impactos ambientais ao longo do ciclo de vida da edificação considerou os sistemas construtivos AEC e TP. Os detalhes referentes aos sistemas construtivos e um croqui arquitetônico estão apresentados na Figura 1, base para ambos os sistemas construtivos. Para o sistema construtivo em TP foram realizadas adaptações no projeto, de modo a atender aos requisitos estabelecidos na NBR 17014 [9], na Portaria n° 959 [10] e às recomendações de profissionais da área. As etapas consideradas foram de subestrutura, superestrutura, vedações e cobertura, com a descrição dos materiais apresentados no Quadro 1. A terra empregada nas paredes de TP e sua dosagem estão em

conformidade com as recomendações delineadas por Caldas *et al.* [11] e com os padrões estabelecidos pela NBR 17014 [9]. Maiores detalhamentos acerca do quantitativo de materiais de ambos o sistema, podem ser encontrados no estudo de Castilho [12].

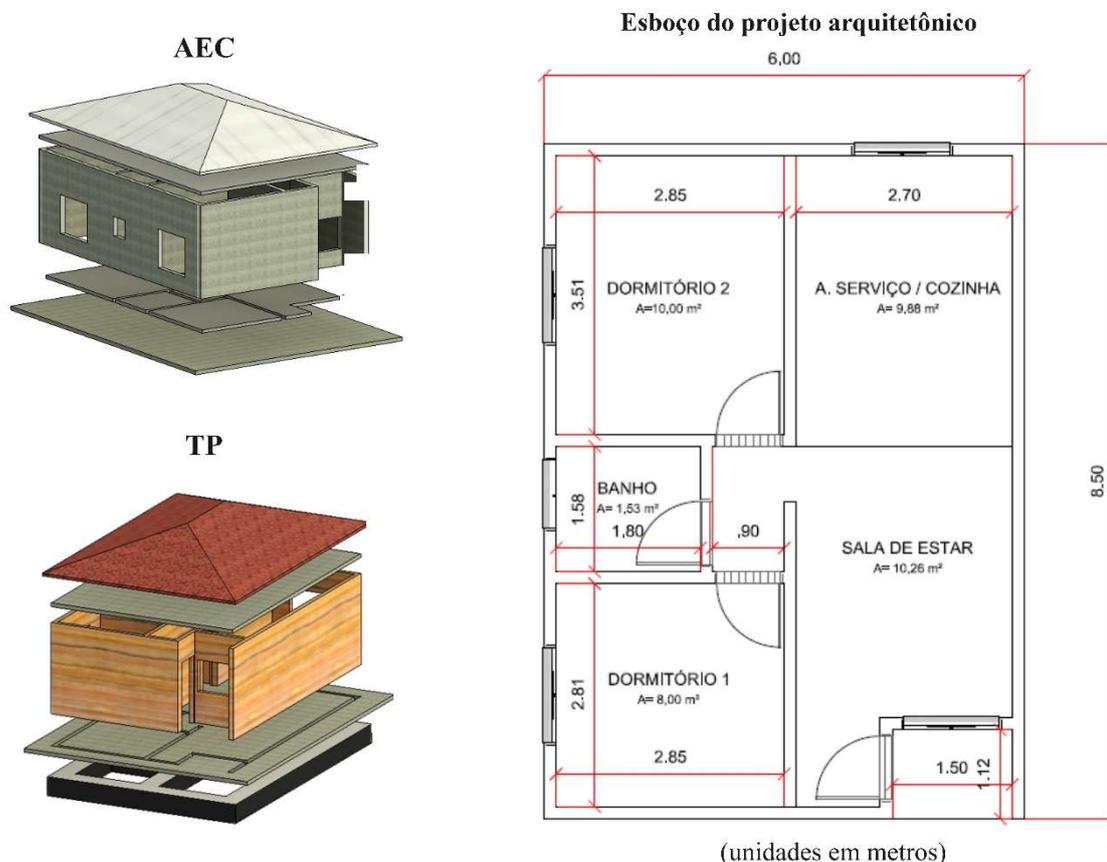


Figura 1: Simplificação dos sistemas construtivos e croqui arquitetônico. Fonte: Adaptado de Castilho [12]

Quadro 1: Descrição resumida dos materiais conforme o sistema construtivo

Etapa/Sistema construtivo	AEC	TP
Fundação	Radier em concreto com impermeabilizante asfáltico	Viga Baldrame com impermeabilizante asfáltico
Parede autoportante (espessura 15 centímetros; pé direito 2,70 metros)	Bloco estrutural cerâmico argamassado e preenchido com graute e aço	Mistura de terra e cimento: (70% areia, 30% argila e 5% cimento CII-Z-32)*
Verga/contraverga	Canaleta estrutural cerâmica preenchida com graute e aço	Madeira
Revestimento	Sistema chapisco e emboço Contrapiso	Resina acrílica Contrapiso
Laje	Vigotas treliçadas com placa de EPS	Vigotas treliçadas com lajotas cerâmicas
Cobertura	Estrutura de madeira com telha de concreto	Estrutura de madeira com telha cerâmica

(*) Os teores dos materiais empregados foram determinados conforme os requisitos apresentados na norma ABNT 17014 [13].

Fonte: Castilho [12]

2.1. Desenvolvimento da ACV

Para o desenvolvimento da ACV seguiu-se a estrutura apresentada nas normas ABNT 14040 [14] e 14044 [15], empregando-se o software SimaPro 9.1.1 com a base de dados Ecoinvent 3.8 e o método CML-baseline, analisadas todas as categorias de impacto deste último. A análise contempla o ciclo de vida de uma HIS térrea, para referidos sistemas construtivos, do “berço ao portão”, que abrange duas fases do ciclo de vida, referentes à pré- operação e operação, sendo considerados os materiais de construção utilizados para a fabricação das HISs e reposições de materiais durante sua vida útil. Na pré- operação foram considerados os materiais necessários até a finalização da construção, já na fase de operação somente as substituições necessárias de materiais durante o uso da construção devido à processos de manutenção foram consideradas. Ademais, tomou-se como base uma vida útil de 50 anos de construção [16]. Explicita-se que não foram considerados a produção e manutenção de infraestrutura (máquinas e meios de transporte, por exemplo.), o transporte do insumo água, a energia consumida pela edificação e, ainda, a lona plástica 150 micras referente à execução do radier.

Para os dados de entrada (primários), levou-se em conta as quantidades de insumos levantadas para as habitações de cada sistema construtivo e estimados a partir do estudo de caso. Para os dados de saída (secundários), foram extraídos da base de dados Ecoinvent, disponível no software Simapro. Na fase inventário do ciclo de vida, o processo de cadastro dos insumos no software Simapro para as duas fases da ACV foi discriminado a partir da utilização de dados secundários extraídos da base Ecoinvent. A versão da base de dados utilizada para o cadastro dos materiais foi a Ecoinvent 3.8 – *allocation, cut-off by classification – unit*. No Quadro 2 estão descritos os materiais presentes no quantitativo dos sistemas construtivos e os correspondentes selecionados na base de dados.

Quadro 2: Materiais selecionados na base de dados

Material	Correspondente na base de dados
Aço	<i>Steel, low-alloyed, hot rolled {RoW} production Cut-off, U</i>
Água	<i>Tap water {BR} tap water production, conventional treatment Cut-off, U</i>
Areia	<i>Sand {BR} market for sand Cut-off, U</i>
Argila	<i>Clay {RoW} clay pit operation Cut-off, U</i>
Bloco cerâmico	<i>Clay brick {GLO} market for Cut-off, U</i>
Brita	<i>Gravel, crushed {BR} market for gravel, crushed Cut-off, U</i>
Cimento Portland	<i>Cement, Portland {BR} market for cement, Portland Cut-off, U</i>
Cal hidratada	<i>Lime, packed {RoW} lime production, milled, packed Cut-off, U</i>
Compensado plastificado	<i>Plywood, for outdoor use {RoW} production Cut-off, U</i>
Madeira pinus (forma de concretagem)	<i>Sawnwood, softwood, raw, dried (u=20%) {RoW} market for Cut-off, U</i>
Impermeabilizante asfáltico	<i>Bitumen seal, VA4 {RoW} production Cut-off, U</i>
Lajota cerâmica	<i>Clay brick {GLO} market for Cut-off, U</i>
Madeira pinus (demais usos)	<i>Sawnwood, hardwood, dried (u=10%), planed {RER} market for Cut-off, U</i>
Placa EPS	<i>Polystyrene, general purpose {RoW} production Cut-off, U</i>
Telha cerâmica	<i>Ceramic tile {RoW} production Cut-off, U</i>
Telha de concreto	<i>Concrete roof tile {RoW} production Cut-off, U</i>
Verniz acrílico	<i>Acrylic varnish, without water, in 87.5% solution state {RoW} acrylic varnish production, product in 87.5% solution state Cut-off, U</i>

Fonte: Castilho [12]

A versão utilizada não considera o reuso de resíduos ou produtos e materiais recicláveis, dessa maneira, os impactos consideram os impactos que ocorrem no processo produtivo sem a redução de materiais recicláveis [17]. Para mais, uma vez que a base de dados Ecoinvent utilizada se baseia no princípio de alocação, este procedimento não foi realizado durante o processo de desenvolvimento do inventário e levantamento de dados. Além disso, neste estudo, foram excluídos o contrapiso e a estrutura de madeira para o telhado, uma vez que suas quantidades são semelhantes em ambos os sistemas. Isso significa que não contribuem para a análise, uma vez que se trata de um comparativo. Por fim, explicita-se que os dados de caracterização, pós cálculo dos impactos de ambos os sistemas, foram normalizados. A normalização consiste em dividir os impactos gerados pelo produto, por categoria, pelos impactos gerados em alguma referência temporal e geográfica e pela população local ou mundial [18]. A base de dados normalizada empregada nesta pesquisa foi a World 2000, disponível no SimaPro para o método CML-baseline.

3. Resultados e discussões

Neste item serão apresentados os resultados relativos aos impactos ambientais da habitação nas fases de pré-operação e operação, das etapas construtivas e totais para ambos os sistemas construtivos.

3.1. Impactos das fases de pré-operação e operação

A participação das duas fases do ciclo de vida da residência, em relação às categorias de impactos do estudo, está apresentada na Figura 2.

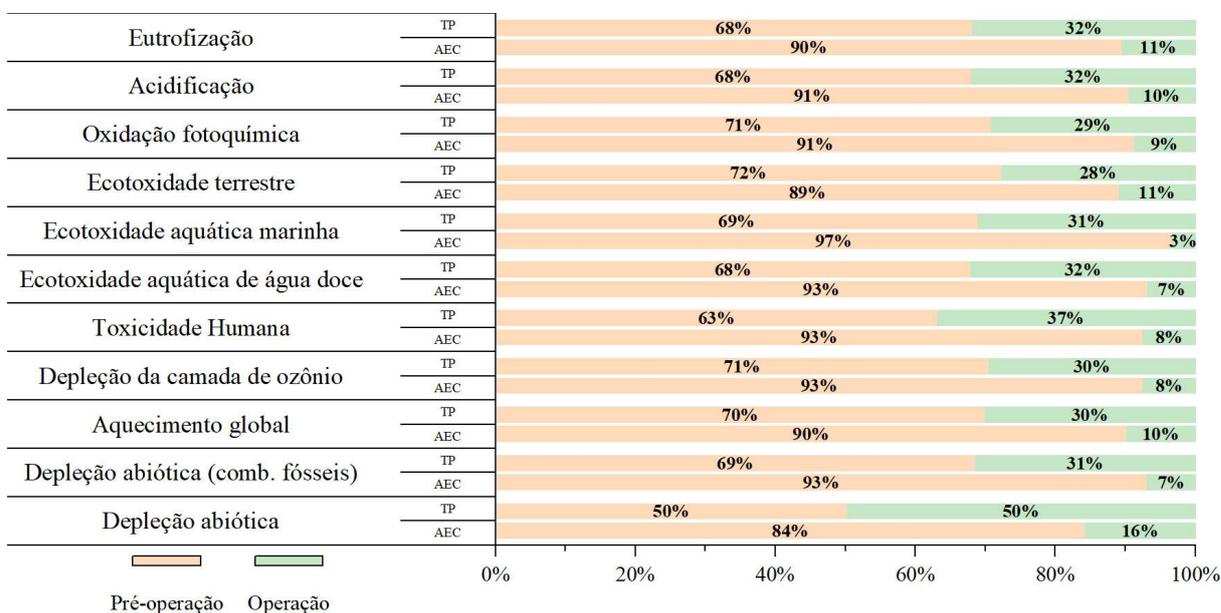


Figura 2: Impactos das fases da construção na habitação para os sistemas em AEC e TP. Fonte: Adaptado de Castilho [12]

Para ambos os sistemas construtivos, a fase de maior relevância do ciclo de vida para todas as categorias de impacto é a pré-operação. No sistema AEC, os impactos para todas as categorias analisadas na fase de pré-operação superam 80% do impacto total. No sistema TP, por outro lado, a fase de operação apresenta uma contribuição maior em relação à pré-operação; no entanto, esta última ainda supera 50% dos impactos por categoria. Apesar dos avanços na durabilidade das estruturas modernas de terra, a exposição às intempéries,

juntamente com a falta de cura e estabilização adequadas do solo, pode resultar em uma maior necessidade de manutenção dessas construções [7]. Isso pode justificar a observação de uma contribuição maior da fase de operação do sistema em TP em comparação com a fase de construção no ciclo de vida do edifício.

Destaca-se que, para o sistema em AEC, a ecotoxicidade aquática marinha apresenta maior contribuição na fase de pré-operação, representando cerca de 97% do total. Já para a fase de operação, a categoria de impacto com maior participação é a depleção abiótica, representando cerca de 16%. Para o sistema em TP, a maior contribuição na fase de pré-operação é referente à ecotoxicidade terrestre, atingindo cerca de 72%. De forma análoga ao sistema em AEC, na fase de operação, a depleção abiótica apresenta maior participação, representando cerca de 50%.

Tanto para o bloco cerâmico presente no sistema AEC quanto para a parede de TP, a terra é o principal insumo. No entanto, este material é utilizado em proporções distintas, já que os blocos cerâmicos não são maciços e geralmente possuem menor espessura em comparação com a parede de TP. Além disso, na fabricação dos blocos cerâmicos, há um processo de queima que requer uma alta demanda de energia. Como resultado, os impactos causados pela extração e consumo da terra são diluídos em relação às outras categorias influenciadas pelo consumo energético, no sistema em AEC. Por outro lado, para a TP, onde a terra é utilizada em seu estado natural, surge a hipótese de uma sobrecarga na categoria de impacto da ecotoxicidade terrestre em comparação com as demais, devido à ausência dessa diluição. Portanto, observa-se que o processo de queima da terra desempenha um papel relevante na geração de impactos ambientais durante a fase de pré-operação.

3.2. Impactos das etapas construtivas

A análise dos impactos dos materiais empregados na pré-operação de residências, abrangendo as fases de subestrutura, superestrutura, revestimento e cobertura, está delineada na Figura 3. No contexto do sistema em AEC, destaca-se a superestrutura (composta por elementos como alvenaria, vergas, contravergas e laje) como a principal fonte de impacto, representando aproximadamente 90% da ecotoxicidade aquática marinha. Por outro lado, a cobertura, materializada na forma de telhas de concreto, registrou contribuições mínimas, com destaque para a depleção abiótica, correspondendo a 5,6% do total. No que concerne ao revestimento, observou-se que esta etapa exerce uma influência mais significativa na categoria de aquecimento global, contribuindo com cerca de 28% do impacto total. Uma análise pormenorizada dos materiais utilizados, tanto na fase pré-operacional quanto na operacional, evidenciou que o bloco cerâmico se destaca como o principal contribuinte em todas as categorias consideradas, atingindo uma representatividade de aproximadamente 77% na ecotoxicidade aquática marinha, além de desempenhar um papel relevante nas categorias de depleção abiótica (derivada de combustíveis fósseis), depleção da camada de ozônio e aquecimento global. Por fim, o aço, o cimento Portland e as telhas de concreto também demonstraram contribuições significativas nas categorias analisadas.

Para o sistema em TP, considerando tanto a fase de pré-operação quanto de operação da residência, constatou-se que a superestrutura (composta pela parede de TP, vergas, contravergas e laje) emerge como a etapa de maior impacto nas categorias avaliadas, com exceção da depleção abiótica, na qual a cobertura (telha cerâmica) registrou cerca de 59%. Destaca-se que a categoria mais relevante para a superestrutura é o aquecimento global, com 64%. A subestrutura (fundação) alcançou uma contribuição máxima de cerca de 20% para a ecotoxicidade aquática de água doce. Por outro lado, o revestimento (verniz acrílico) é a etapa

de menor contribuição, representando aproximadamente 11% para a oxidação fotoquímica. Além disso, observou-se que a telha cerâmica é o material de maior contribuição em todos os impactos ambientais avaliados para o sistema em TP, seguido pelo aço, verniz acrílico e lajota cerâmica. Uma análise específica dos materiais empregados na parede de TP (terra, água e cimento Portland) revela que, nas categorias analisadas, o impacto desses materiais é relativamente baixo, sendo inferior a 10% em todas elas.

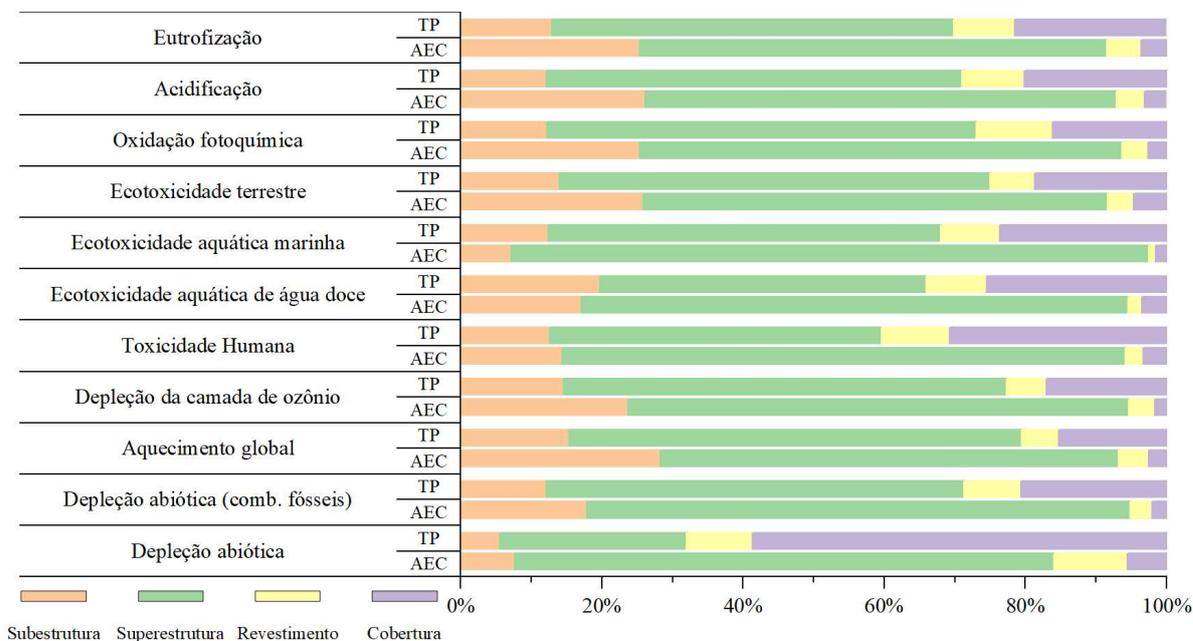


Figura 3: Impactos das etapas da construção na habitação para os sistemas em AEC e TP. Fonte: Adaptado de Castilho [12]

3.3. Impactos totais dos sistemas construtivos

A Tabela 1 apresenta as contribuições das residências para as categorias de impacto consideradas, abrangendo tanto o sistema em AEC quanto em TP. Entre as onze categorias analisadas, o sistema em AEC demonstrou uma influência maior nos impactos em oito delas. O aquecimento global foi a categoria que apresentou a maior discrepância entre os sistemas construtivos investigados (149%), considerando a AEC como referência, seguida pela depleção da camada de ozônio (114%). Por outro lado, o sistema em TP registrou a maior contribuição para a depleção abiótica, atingindo uma diferença de aproximadamente 48% em relação ao AEC.

A partir dos resultados obtidos, observa-se que o perfil ambiental da AEC é mais nocivo, uma vez que apresenta uma maior quantidade de emissões para a maioria das categorias de impacto analisadas. Entretanto, é importante ressaltar que o sistema em TP demonstrou um desempenho ambiental inferior para as categorias Toxicidade Humana, Ecotoxicidade aquática de água doce e Depleção abiótica. Embora este último sistema registre menores impactos nessas categorias específicas, é fundamental evitar qualquer juízo de valor entre elas, uma vez que cada categoria deve ser analisada individualmente, mesmo havendo variação de valores que variam da ordem milhões de kg equivalentes à décimos de milésimo, como mostrado na Tabela 1.

A análise comparativa dos impactos totais normalizados foi realizada com o objetivo de converter os valores dos indicadores de categoria de impacto em uma mesma unidade, a fim de identificar sua significância relativa. Consta-se que, para os valores normalizados, a AEC apresenta uma maior contribuição nos impactos ambientais totais para as categorias avaliadas,

totalizando $1,28 \times 10^{-7}$, enquanto a TP alcança $7,63 \times 10^{-8}$. Portanto, os impactos causados pelo sistema em AEC são aproximadamente 68% maiores do que os causados pelo sistema em TP.

Tabela 1: Comparativo entre os dados de caracterização das residências em AEC e TP

Categorias de impacto	Unidade	AEC	TP	Diferença (%)
Aquecimento global	kg CO ₂ eq	1,98E+04	7,92E+03	149%
Depleção da camada de ozônio	kg CFC-11 eq	1,30E-03	6,06E-04	114%
Ecotoxicidade aquática marinha	kg 1,4-DB eq	2,34E+07	1,34E+07	75%
Depleção abiótica (combustíveis fósseis)	MJ	1,69E+05	9,84E+04	72%
Acidificação	kg SO ₂ eq	5,71E+01	3,82E+01	49%
Oxidação fotoquímica	kg C ₂ H ₄ eq	3,75E+00	2,82E+00	33%
Eutrofização	kg PO ₄ eq	1,60E+01	1,26E+01	27%
Ecotoxicidade terrestre	kg 1,4-DB eq	1,86E+01	1,55E+01	20%
Toxicidade Humana	kg 1,4-DB eq	7,39E+03	7,50E+03	-2%
Ecotoxicidade aquática de água doce	kg 1,4-DB eq	5,72E+03	6,43E+03	-11%
Depleção abiótica	kg Sb eq	1,01E-01	1,94E-01	-48%

Fonte: Elaborado pelos autores.

4. Conclusão

A fase operacional no sistema em TP apresentou maior relevância nos impactos analisados. Dessa forma, para otimizar o desempenho ambiental nesta fase, são necessários estudos sobre o comportamento dos insumos básicos que compõem a parede de TP, bem como dos componentes do sistema, a exemplo do revestimento, visando aumentar sua durabilidade.

Em relação à análise das etapas construtivas, observou-se que a superestrutura apresenta maior contribuição nos impactos por categoria, para ambos os sistemas. Além disso, ao examinar detalhadamente a contribuição de cada material, notou-se que alguns deles, e apresentam impacto mais significativo do que outros, a exemplo do bloco cerâmico, cimento e telha de concreto para o sistema em AEC, e da telha cerâmica, aço, verniz e lajota cerâmica para o sistema em TP. Esse resultado destaca a importância da especificação criteriosa dos materiais de construção durante a fase de projeto.

A exemplo do sistema em TP, que demanda um volume considerável de terra impactando mais acentuadamente na Depleção Abiótica, a preferência pelo uso de terra de reuso, como materiais provenientes de escavações ou de atividades de cortes e aterros, pode consolidar uma alternativa menos prejudicial em termos ambientais, em consonância com o observado por Caldas et al. [11]. Assim, os estudos do perfil ambiental permitem ao projetista otimizar o sistema construtivo escolhido, por meio da revisão dos materiais, processos e equipamentos previstos dentro do sistema de produto. Nesse contexto, a ACV emerge como uma potencial ferramenta projetual, fornecendo suporte ao projetista em relação a possíveis substituições de insumos considerados mais prejudiciais ao meio ambiente. Para isso, sugere-se uma escolha que priorize materiais menos processados, ou ainda subprodutos de outros processos produtivos.

Salienta-se, por fim, que alterações em parâmetros projetuais como espessura das paredes e proporção dos insumos que compõem a taipa, influenciam diretamente no perfil ambiental desse sistema. Assim, extrapolações das análises dos perfis ambientais dos sistemas avaliados

podem ser realizadas desde que observadas as condições de contorno detalhadas no presente estudo.

Referências

- [1] BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. *Cerâmica*, v. 61, p. 178-189, 2015.
- [2] CORRÊA, L. R. Sustentabilidade na construção civil. 2009. Monografia (Curso de Especialização em Construção Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.
- [3] YEMAL, J. A.; TEIXEIRA, N. O. V.; NAAS, I. A. Sustentabilidade na construção civil. In: *International Workshop Advances In Cleaner Production*. 2011. p. 1-10.
- [4] CAMPESTRINI, T. F.; GARRIDO, M. C.; MENDES JUNIOR, R.; SCHEER, S.; FREITAS, M. C. D. Entendendo BIM: uma visão do projeto de construção sob o foco de informação. 1 ed., 2015.
- [5] NOWOTNA, A.; PIETRUSZKA, B.; LISOWSKI, P. Eco-Friendly Building Materials. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, v. 290, n. 1, p. 12024, 2019. doi: 10.1088/1755-1315/290/1/012024
- [6] ARINI, R. Arquitetura de terra: uma solução ecológica, econômica e autossustentável, *Revista de Direito da Cidade*, vol. 7, no 1, p. 303–312, fev. 2015, doi: <https://doi.org/10.12957/rdc.2015.15196>
- [7] KULSHRESHTHA, Y.; MOTA, N. J. A.; JAGADISH, K.S.; BREDENOORD, J.; VARDON, P. J.; LOOSDRECHT, M. C. M.; JONKERS, H. M. The potential and current status of earthen material for low-cost housing in rural India, *Construction and Building Materials*, v. 247, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118615>
- [8] SANTOS, M. F. N. D.; BATTISTELLE, R. A. G.; HORI, C. Y.; JULIOTI, P. S. Importância da avaliação do ciclo de vida na análise de produtos: possíveis aplicações na construção civil. *Revista Gestão da Produção, Operações e Sistemas*, n. 2, p. 57, 2011.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17014: Taipa de pilão: requisitos, procedimentos e controle. Rio de Janeiro, 2022.
- [10] MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO AGRÁRIO. Portaria n° 959, de 18 de maio de 2021. Estabelece requisitos para implementação de empreendimentos habitacionais no âmbito da linha de atendimento Aquisição subsidiada de imóveis novos em áreas urbanas, integrante do Programa Casa Verde e Amarela. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 19 de maio de 2021. Seção 1: 155-174.
- [11] CALDAS, L. R.; PAIVA, R. D. L. M.; MARTINS, A. P. S.; TOLEDO FILHO, R. D. Argamassas de terra versus convencionais: avaliação do desempenho ambiental considerando o ciclo de vida. *Mix sustentável*, vol. 6, no 4, p. 115–128, 2020.
- [12] CASTILHO, B. C. Avaliação do Ciclo de Vida entre edificações de alvenaria estrutural e taipa de pilão: estudo de caso. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana, 2022.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17014: Taipa de Pilão – Requisitos, procedimentos e controle. Rio de Janeiro, 2022.

- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14040: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2014.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14044 - Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009.
- [16] PILZ, T. L.; MACENO, M. M. C. Avaliação do ciclo de vida e construção civil: uma revisão da literatura acerca da avaliação de residências unifamiliares. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, v. 6, n. 1, p. 0049-0055, 2020. doi: <https://doi.org/10.18540/jcecvl6iss1pp0049-0055>
- [17] ECOINVENT. Geographies names coordinates shortcuts overlaps, 2022.
- [18] HEIJUNGS, R.; SUH, S. *The computational structure of life cycle assessment*. Dordrecht; London: Springer, 2011. doi: <https://doi.org/10.1007/978-94-015-9900-9>

Aplicação do *Virtual Design and Construction* - VDC: uma interface entre o BIM e AWP em edificações sustentáveis

Application of Virtual Design and Construction - VDC: an interface between BIM and AWP in sustainable buildings

Cristiane do Bom Conselho Sales Alvarenga, Mestre em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

e-mail: crisbcs@gmail.com

Rosemary do Bom Conselho Sales, Doutora em Engenharia Mecânica, Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG).

e-mail: rosemary.sales@uemg.br

Rodrigo Barreto Caldas, Doutor em Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

e-mail: caldas@dees.ufmg.br

Maria Teresa Paulino de Aguiar, Doutora em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

e-mail: teresa@ufmg.br

Resumo

As tecnologias digitais representam avanços para o setor da construção civil e podem promover o seu processo de transformação pela busca de uma edificação sustentável. Nesse sentido, estratégias como *Virtual Design and Construction* (VDC) integradas ao *Building Information Modeling* (BIM) e ao *Advanced Work Packaging* (AWP), destacam-se como potenciais caminhos para a criação um sistema de produção limpo, colaborativo e compartilhado, com maior eficiência no uso de recursos naturais como água, energia e materiais e melhoria na qualidade de vida das pessoas. Nesse artigo, foi feito um levantamento do estado da arte dos assuntos abordados e um estudo de caso real de práticas do VDC descrevendo os meios e os métodos utilizados na interface entre o BIM e AWP. Os resultados mostraram que a transformação do modelo de gestão tradicional permite a integração do BIM e AWP e pode promover a transformação do setor em todas as etapas de uma edificação com qualidade, produtividade, confiabilidade e segurança.

Palavras-chave: Construções Sustentáveis; BIM; AWP; VDC

Abstract

Digital technologies represent advancements for the construction sector and can promote its transformation process through the pursuit of sustainable building. In this sense, strategies such as Virtual Design and Construction (VDC) integrated with Building Information Modeling (BIM) and Advanced Work Packaging (AWP) stand out as potential paths for creating a clean, collaborative, and shared production system, with greater efficiency in the use of natural resources such as water, energy, and materials, and improvement in people's quality of life. In this article, a state-of-the-art survey of the addressed subjects was conducted, along with a real case study of VDC practices describing the means and methods used at the interface between BIM and AWP. The results showed that transforming the traditional management model allows the integration of BIM and AWP and can promote the transformation of the sector at all stages of a building with quality, productivity, reliability, and safety.

Keywords: Sustainable Buildings; BIM; AWP; VDC.

1. Introdução

Com a publicação do relatório “Os Limites do Crescimento” desde as décadas de 1970 o mundo tem se preocupado cada vez mais com a escassez de recursos naturais, aumento da poluição, desmatamento e os impactos sociais e ambientais decorrentes do acelerado crescimento industrial [1] [2]. Em 2015, a Organização das Nações Unidas (ONU) estabeleceu os objetivos do desenvolvimento sustentável, os quais deveriam ser alcançados até 2030. Dentre esses objetivos destaca-se: construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização sustentável e fomentar a inovação [3]. Tal preocupação é relevante uma vez que o mercado global de construção e infraestrutura é avaliado em US\$ 2,72 trilhões de dólares, devendo atingir US\$ 3,69 bilhões até 2029, com taxa de crescimento anual de 6,27% [4]. Associado a esse elevado desempenho econômico a indústria da construção civil é responsável por vários impactos ambientais.

Neste contexto, os projetos e construções da próxima geração, devem buscar minimizar esses impactos negativos, com um melhor equilíbrio entre os prazos de construção e operação, reduzindo custos, além de atender as necessidades dos usuários no contexto da sua interação com o entorno [5]. Com isso os princípios de sustentabilidade devem ser incorporados aos processos das construções [6] e um dos caminhos para se alcançar tais metas seria a adoção da construção inteligente [7]. Por ser uma abordagem inovadora a construção inteligente possibilita otimizar os processos de análises das características físicas e funcionais das edificações, como previsões de desempenho energético e térmico, buscando melhorar o conforto e ao mesmo tempo o bem-estar dos usuários [8]. Dessa forma, o uso integrado de tecnologias digitais auxilia o processo de gestão e pode promover a transformação do setor em todas as etapas de uma edificação com qualidade, produtividade, confiabilidade e segurança. Rafsanjani e Nabizadeh [9] ressaltam que a pandemia de Covid 2019, impôs mudanças significativas nesse processo, isso porque houve uma necessidade crescente de adoção de tecnologia digitais em todos os setores empresariais para colaboração remota. Nesse cenário, as estratégias de VDC integradas ao BIM e ao AWP se apresentam como potencial recurso às novas estruturas de gerenciamento de projetos para criar um sistema de produção colaborativo, compartilhado e sustentável.

O objetivo desse estudo foi analisar a contribuição das práticas AWP integradas ao BIM para maximizar os resultados da aplicação do *Virtual Design and Construction* (VDC). Para tal foi feita uma pesquisa exploratória, descritiva e prescritiva, para a compreensão detalhada do que está sendo estudado [10] [11]. Com base no estado da arte buscou-se identificar no mercado de construção uma aplicação prática dos meios e dos métodos utilizados, para melhorar a performance das empresas em projetos de grande complexidade, com inovação e sustentabilidade [12]. Desse modo, para a aplicação prática escolhida será apresentado um estudo de caso com uso das duas metodologias integradas BIM e AWP para avaliar sua contribuição no VDC.

2. Transformação Digital

A transformação digital permite que as empresas alcancem maior eficiência e flexibilidade, otimizem os processos produtivos, gerem propostas de valor para os ecossistemas com inovação e respondam em tempo hábil às necessidades do mercado [13], [14], [15]. Além disso, é essencial que as empresas mantenham a sua competitividade no mercado e permaneçam no caminho da inovação tecnológica [16]. Dessa forma, a busca por soluções digitais integradas que suportem esse processo, pode alavancar resultados sustentáveis em projetos de capital e infraestrutura. De acordo com a ONU, até 2050 a população mundial será de 9,7 bilhões e a indústria da construção deve buscar formas mais inteligentes e eficazes de projetar e construir

[17]. Alinhado com as tendências globais as empresas devem direcionar esforços em projetos que estejam conectados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Dessa forma, para garantir um planeta vivo e uma vida de qualidade para as gerações futuras, todos devem colaborar digitalmente para superar as barreiras culturais. A meta deve ser, criar modelos de gestão mais duradouros, além de refletir sobre diferentes formas de obter valor e recompensas nos projetos [18]. Nesse sentido, o setor da construção se esforça para inovar e incorporar a seus processos as novas tecnologias digitais, de modo a melhorar os sistemas operacionais e de negócios.

Nessa perspectiva, práticas que corroboram com a economia, aumento de produtividade e sustentabilidade, ganham força em todo o mundo. A integração transdisciplinar do *Building Information Modeling* (BIM), o *Advanced Work Packaging* (AWP) e a *Internet of Things* (IoT) contribuem para melhorar os resultados em projetos de grande complexidade. Essas práticas incorporadas no ciclo de vida do empreendimento, nas fases iniciais de projeto (conceitual, básico e de detalhamento), na construção, na operação e manutenção de sistemas estruturais industriais, favorecem a comunicação e a colaboração entre as equipes. Isso reflete na melhoria de produtividade e na redução de prazos e custos. Segundo Weiking *et al.* [19] a transição para a digitalização das indústrias é crucial para as empresas manterem a vantagem competitiva e aproveitarem novas oportunidades. Gierej [20] analisa o impacto que a IoT tem na economia e nos modelos de negócio. Em uma perspectiva de ecossistema, essas práticas devem influenciar as estratégias de tecnologias da informação, em uma sucessão de abordagens transformacionais da Indústria 4.0 [21]. Com esse desenvolvimento crescente a indústria da construção civil está sendo impulsionada para adotar ferramentas que sejam capazes de apoiar os processos de produção em plataformas integradas, o que está redefinindo a forma como as empresas operam.

2.1 *Building Information Modeling (BIM)*

Embora não exista uma única definição para a metodologia BIM diferentes autores o conceituaram e mostram seu valor ao longo dos anos [22], [23], [24]. Na prática o BIM é um processo colaborativo baseado em modelos digitais que contemplam informações e dados sobre um projeto de construção ao longo de seu ciclo de vida. Essa abordagem compreende não apenas a geometria tridimensional dos elementos, mas fornece informações sobre propriedades, relações e as suas características [25], [26], [27]. Esses atributos podem fornecer dados como: *tag*, dimensões, elevações, coordenadas, peso, materiais, *status*, empacotamentos, fases de instalações entre outras atividades, necessárias para a engenharia, construção e operação. No entanto, o BIM usualmente fornece dados estáticos do ambiente construído e não pode ser atualizado em tempo real sem fontes de dados adicionais [28]. Com a chegada da IoT, entendida como interconexões de dispositivos e sensores capazes de realizar trocas de informações em diferentes plataformas [29], possibilitou a detecção e uma maior integração e sincronização de dados. Estudos de Aram e Eastman [30] mostram que as ferramentas de modelagem BIM integradas a IoT podem promover um eficiente gerenciamento do ciclo de vida da construção. Assim, o BIM e a IoT podem auxiliar no monitoramento em tempo real do processo [31], [32], [33], com melhor colaboração entre as partes interessadas, eficiência dos processos, redução de erros e retrabalho. No Brasil a adoção do BIM teve um significativo crescimento nos últimos anos. O Governo Federal criou em 2017 o Comitê Estratégico de Implementação do BIM para impulsionar a sua utilização em nível nacional. Em 2020 publicou o Decreto nº 10.306 com diretrizes para promover a transformação digital na indústria da construção e mais recente a Lei de Licitações, nº 14.133 de 2021 onde estabelece que “nas licitações de obras e serviços de engenharia e arquitetura, será adotado a tecnologia BIM ou processos similares, mais avançados que venham a substituí-lo” [34]. Contudo, o BIM no ambiente de construção ainda apresenta

limitações, mas o seu uso desde a concepção do projeto irá facilitar o trabalho fornecendo informações qualificadas para controlar o empreendimento. Com foco nos estágios iniciais, a integração transdisciplinar e a incorporação de outras práticas aos processos BIM como o *Advanced Work Packaging* (AWP) se complementam no atendimento aos requisitos de sustentabilidade das construções [35].

2.2 *Advanced Work Packaging* (AWP)

O AWP é uma abordagem sistemática para melhorar a capacidade, a produtividade e a previsibilidade das construções, por meio da integração das atividades, ao longo do ciclo de vida do projeto. Ele foi criado pelo *Construction Industry Institute* (CII) para superar os desafios de custos e prazos por meio do planejamento de engenharia, orientado pelo sequenciamento da construção [36]. O AWP se consolidou como um *framework* que pode ser utilizado para dividir o escopo do projeto em pacotes gerenciáveis de trabalho com foco no planejamento e execução, a fim de alcançar maior produtividade e maior previsibilidade [37]. Segundo a norma industrial RT-272-1 [38] os benefícios da adoção do AWP são percebidos tanto no aumento da produtividade quanto na redução dos custos. Embora, o processo de divisão em pacotes seja feito de forma distinta para cada projeto, existe um consenso na formalização dos termos relevantes da metodologia. Dessa forma, o CII classificou os pacotes de trabalho em: CWA, CWP, EWP, PWP e IWP conforme apresentado na Figura 1.

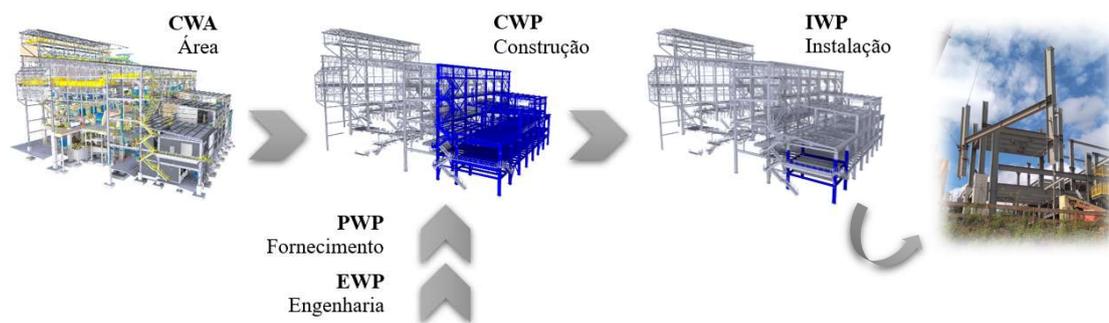


Figura 1: Esquema de classificação dos pacotes de trabalho na metodologia AWP em projeto de capital.
Fonte: elaborado pelos autores.

O *Construction Work Area* (CWA) é definido por limites físicos e lógicos estabelecidos pelo plano de execução do projeto, para se relacionar com as divisões do escopo. A CWA se divide em disciplinas (mecânica, tubulação, elétrica, dentre outros) e atividades que formam o *Construction Work Package* (CWP), uma divisão lógica e controlável do trabalho no âmbito da construção. O CWP corresponde as atividades listadas no cronograma master do projeto, o *Installation Work Package* (IWP) é subdivisão do CWP e deve ser definida na fase de construção, para determinar um fluxo de trabalho programado para um período de uma a duas semanas. Os *Engineering Work Packages* (EWP) estão diretamente relacionados a um CWP e formam o conjunto necessário e suficiente de documentos técnicos de engenharia para que o trabalho seja executado em sua totalidade. De forma semelhante, o *Procurement Work Package* (PWP) refere-se as entregas de fornecimento para um determinado CWP, contendo todos os materiais necessários para executar as atividades na construção na quantidade correta e no momento adequado [39]. Os pacotes de trabalho em suas diferentes fases do empreendimento, ou seja, CWA (área de construção), o EWP (a engenharia), PWP (o fornecimento), CWP (a construção) e IWP (a instalação) reduzem as atividades que não agregam valor, reduzem os desperdícios, geram menos resíduos e os custos são mais baixos [40]. Sob essa lógica a metodologia AWP permite que as equipes de suprimentos priorizem as aquisições e as entregas

dos PWP's de acordo com o sequenciamento de execução da obra, o que contribui para melhorar a produtividade e previsibilidade em Projetos de Capital [41], [42]. Contudo, a transformação digital não depende somente das tecnologias BIM e AWP, mas também da melhoria dos processos e da capacitação das pessoas e das empresas que pode ser alcançado fazendo uso de práticas como o VDC.

2.3 Virtual Design and Construction (VDC)

O VDC é uma estrutura de gerenciamento de projetos desenvolvida no Centro de Engenharia de Instalações Integradas (CIFE) da Universidade de *Stanford*. O VDC tem como objetivo melhorar o planejamento, concepção, construção e operação de projetos de construção por meio da gestão combinada e por meio métodos de colaboração, gestão de produção e tecnologias digitais. Ele favorece estratégias de pesquisa e desenvolvimento para melhorar a confiabilidade, produtividade, inovação e sustentabilidade na construção [43]. Essa abordagem é especialmente importante em projetos de grande complexidade, pois integra tecnologias digitais e práticas, juntamente com conceitos de *Lean Construction*, para otimizar o ciclo de vida de um projeto, desde a concepção até a entrega [44]. No projeto a adoção da modelagem BIM permite uma melhor compatibilização entre disciplinas, detecção de interferências (*clash detection*), quantificação de materiais, planejamento da obra 4D, previsão de custos 5D, entre outros. Na construção é possível melhorar a gestão de materiais, tanto no recebimento, diligenciamento, armazenamento e entrega de materiais em campo, com melhora nos índices de produtividade *Key Performance Indicators* (KPI's). Ele ainda pode auxiliar na operação e manutenção das plantas industriais [45]. Assim, o VDC utiliza ferramentas para melhorar o design, o planejamento, a construção, a gestão de recursos, bem como a visualização, quantificação e gestão de dados, principalmente em projetos de maior escala [46]. De acordo com Rischmoller [47] no VDC o gerenciamento da produção do projeto é utilizado para organizar e controlar as atividades de trabalho. Quando comparado aos métodos convencionais, ele aplica ferramentas e técnicas normalmente empregadas na gestão industrial e de produção (incluindo materiais, informações, equipamentos e mão de obra) e busca-se com isso, otimizar o desempenho para alcançar avanços na qualidade, reduzindo custos e prazo, eliminando o desperdício, melhorando a produtividade nas atividades realizadas. Autores como Fosse, Ballard, e Fischer [44] afirmam que esta abordagem utiliza novas tecnologias colaborativas e equipes multidisciplinares, para melhorar a comunicação entre as diferentes partes interessadas do projeto nas fases de pré-planejamento, design, construção e os modelos VDC favorecem o acesso aos dados compartilhados aos envolvidos (proprietários, arquitetos, engenheiros, empreiteiros, dentre outros).

Na Figura 2 foi demonstrada a estrutura do VDC pela integração de ferramentas, processos e equipes alinhadas a um objetivo comum (que atende aos interesses do projeto e do cliente).



Figura 2: Estrutura VDC seguindo conceito da *Stanford University*. Fonte: Adaptado de Rafsanjani e Nabizadeh (2023).

O *Project Production Management* (PPM) refere-se aos processos utilizados para desenvolver as atividades suportadas por ferramentas de modelagem BIM. O termo "BIM+" na estrutura VDC é atribuído a aplicativos BIM avançados que permitem compreender, controlar e aprimorar a entrega do projeto definindo a sua variabilidade, planejamento do fluxo de trabalho e recursos necessários. O *Integrated Concurrent Engineering* (ICE) tem o intuito de organizar as equipes multidisciplinares em reuniões para avaliarem as atividades de forma rápida e com isso reduzir o tempo de tomada de decisões. Busca-se com isso, aprimorar a qualidade dos resultados e uma melhor integração entre as diferentes disciplinas. Além disso, modelos VDC permitem estimar o desempenho e comparar o que foi previsto versus realizado, para alcançar os objetivos do projeto [48]. A metodologia BIM é um processo essencial nas sessões de ICE, pois permite apresentar os desafios do projeto para as equipes e clientes por meio da aquisição de dados e visualizações 3D e com isso apoiar as tomadas de decisões. O VDC alinha principalmente novas tecnologias baseadas em BIM para repensar os processos de trabalho e para alcançar a maior eficiência na concepção e construção de projetos. Isso exige a aplicação de ferramentas adequadas aos processos otimizados, coordenados por pessoas treinadas, capacitadas e engajadas em um propósito comum. Para garantir o cumprimento dos objetivos torna-se necessário monitorar métricas específicas. Devem ser escolhidos indicadores-chaves, *Key Performance Indicators* (KPI) com base nos objetivos do cliente (desempenho, operação, sustentabilidade e segurança) nos objetivos de projeto (tempo, custos, número de questões resolvidas) e nos fatores gerenciáveis (qualidade e satisfação). Essas métricas são importantes para identificar as correções necessárias visando uma melhoria contínua do processo.

As metodologias BIM e VDC possuem muitos pontos em comum e, portanto, costumam ser confundidas. Ambas se baseiam na colaboração e na comunicação inteligente, contudo, o VDC é mais abrangente, pois utiliza modelos BIM para planejar os processos de construção, englobando elementos como orçamento, estimativa de custos e planejamento (4D, 5D, dentre outros). Permite também que às equipes interajam para atingir de forma mais eficiente os objetivos esperados. Rafsanjani e Nabizadeh [9] afirmam que a indústria da construção está passando por mudanças tecnológicas significativas e que elas estão moldando o seu futuro. Neste sentido é necessário explorar os caminhos para alcançar maior produtividade, com uso de ferramentas integradas ao VDC, da mesma forma a modelagem BIM associada ao AWP podem promover maior eficácia na execução das atividades, orientado pelo sequenciamento da construção, nos custos e nos prazos planejados.

3. Estudo de caso

O projeto selecionado foi uma planta industrial - Salobo III da Vale, onde a autora correspondente do artigo participou como integrante da equipe de engenharia. O Projeto consiste em uma planta de beneficiamento de minério de ferro localizado no estado do Pará no Brasil. A planta possui capacidade de produção de 12Mtpa, sendo composta por unidades de beneficiamento como britagens (primária e secundária), transportadores de correia de longa distância, moagem, flotações, filtração, subestações entre outras instalações necessárias [49]. A construção teve início em 2019 com investimento de US\$ 1,1 bilhão e com a primeira fase concluída obteve-se a capacidade de processamento, ultrapassando 32Mtpa [50]. Na Figura 3 pode ser visualizado parte do modelo BIM federado do projeto do estudo de caso. Durante a fase de planejamento, foi feito um diagnóstico junto às lideranças do projeto e das contratadas para avaliar as rotinas de gestão, maturidade do projeto, dimensionamento de equipes e os principais desafios a serem vencidos. Detectou-se, com isso, a necessidade de um trabalho colaborativo que direcionasse a estratégia do projeto com o modelo federado conectado a um planejamento estruturado e reconhecido por todos.



Figura 3: Modelo BIM federado do complexo Salobo III da Vale

Para que o modelo pudesse funcionar adequadamente, foi necessário consolidar alguns pilares como o uso das metodologias BIM e AWP integradas aos processos e ao conceito de VDC possibilitando gerar rápidas decisões e otimizando os processos de gestão. O planejamento foi fundamentado na metodologia AWP nos conceitos de padronização codificação e nível de detalhamento dos pacotes de trabalho. O modelo de gestão fortaleceu os conceitos integrando e direcionando o fluxo de trabalho entre engenharia, fornecimento e construção. A equipe responsável pela engenharia digital desenvolveu aplicativos para fornecer informações atualizadas dos pacotes de trabalho e de instalação para a gestão de restrições, área de trabalho de programação de campo integrada e sistema de digitalização das rotinas de campo. Com intuito de gerar a colaboração das partes envolvidas, foram definidas rotinas de liderança e operacionais com o intuito de aumentar a produtividade e proporcionar decisões baseadas em dados atualizados (*Look Ahead Planning*), *Pull Planning*, programação semanal, *Check-in/Check-out*, retrospectiva e *Gemba Walk*. O uso dos aplicativos, com base nos modelos BIM, forneceram informações precisas melhorando as tomadas de decisões. A partir do engajamento das equipes foi montada uma estrutura com cinco diretrizes (Figura 5) para aplicar a prática baseadas nos objetivos do cliente, seguido pelos objetivos do projeto, metodologias BIM e AWP e a equipe de engenharia simultânea e integrada (ICE), assim como os processos de gestão da produção (PPM). Tais diretrizes buacam obter maior eficiência na construção de projetos de capital e após concluído todas as diretrizes o projeto é finalizado.

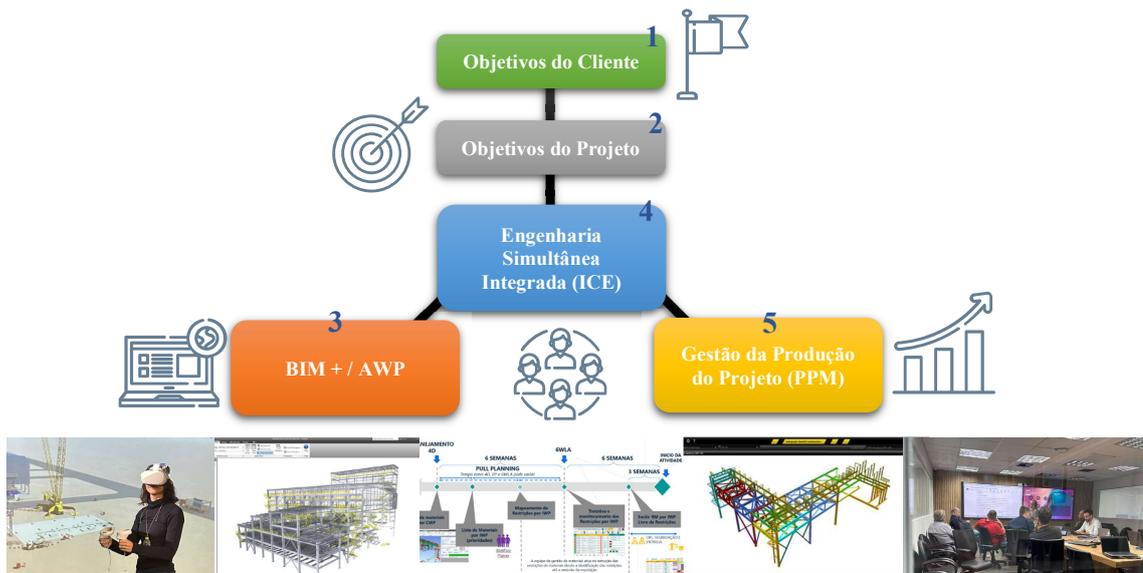


Figura 4: Aplicação do VDC em projeto de capital. Fonte: elaborado pelos autores

4. Resultados

Como resultado do estudo de caso, percebe-se que a transformação do modelo de gestão tradicional para o modelo colaborativo com um planejamento estruturado e reconhecido por todos, viabilizou a integração das metodologias BIM e AWP no contexto do VDC e favoreceu a mudança de *mindset* da liderança. Três instâncias foram articuladas durante a sua implementação, tecnologia, processo e cultura. Na instância tecnológica, os *softwares* atualmente em uso na indústria foram resumidos e categorizados por tipo, função, fase e proprietário/usuário. Na instância do processo, os procedimentos de utilização e funcionamento destas tecnologias ao longo do projeto foram definidos pelos gestores. O papel dos clientes e partes interessadas, foram consideradas nos procedimentos adotados. A instância cultura, tratou das mudanças trazidas pela adoção do VDC para a indústria da construção industrial, juntamente com os meios para promover a sua adoção. Menciona-se aqui a necessidade de apoio das lideranças e as decisões baseadas em fatos e soluções multidisciplinares aumentou o nível de aderência do planejado em relação ao executado o que possibilitou desenvolver as cinco diretrizes:

1) objetivos do cliente: foram estabelecidos inicialmente de forma clara, específica e mensurável, para serem alcançados na fase de operação e manutenção - aumento das vendas e das receitas, redução de custos de operação OpEx, aumento no número de clientes, redução das emissões de carbono (Net Zero); 2) objetivos do projeto: foram definidos para serem alcançados ao final da construção: gastos dentro do previsto no CapEx, nos prazos estabelecidos no cronograma, com qualidade nas entregas e segurança na execução; 3) metodologias BIM e AWP: o BIM adotado na fase inicial de projeto permitiu estruturar o modelo e toda a documentação técnica necessária, considerando os atributos do AWP estabelecidos em reuniões de definição do caminho da construção (*PoC – Path of Construction*). Com base nessas informações, deu-se início a modelagem das edificações apoiada na estratégia a ser adotada na construção. As divisões em CWP's no desenvolvimento do projeto de estruturas metálicas, facilitaram a previsão de intertravamentos provisórios na fase de montagem eletromecânica. As colunas foram listadas considerando a ordem de montagem e as ligações foram indicadas nas vigas que chegavam nas colunas. Para garantir a exequibilidade da divisão por CWP foram previstas juntas de dilatação, além de outros artifícios, quando aplicáveis. As memórias de cálculo e as planilhas de quantitativos de materiais foram elaboradas por CWP (e não por edificações ou códigos de ativos) o que permitiu a gestão integrada e melhores controles nas etapas de suprimentos, fabricação, diligenciamento e inspeção junto aos fornecedores, montadoras e demais empreiteiros; 4) *Integrated Concurrent Engineering* (ICE): foram elaboradas sessões colaborativas para tomada de decisões que viabilizaram uma engenharia simultânea integrada, direcionada por contexto com foco na construção. As equipes multidisciplinares se reuniram para avaliar as atividades buscando uma melhor integração, reduzindo o tempo de tomada de decisões e aprimorando a qualidade dos resultados. Nelas foram definidos os papéis e as responsabilidades dos participantes, as pautas técnicas específicas, o planejamento detalhado. As rotinas de lideranças e operacionais contribuíram para a colaboração das partes envolvidas e o comprometimento das equipes. Os dados utilizados nas rotinas de gestão de prontidão foram atualizados em tempo real com acompanhamento de métricas e planos de ações; 5) processos de gestão: para mapeamento e detecção de oportunidades nos processos de trabalho, foi utilizado o conceito de ciências de operações no PPM. O planejamento foi fundamentado na metodologia AWP e os conceitos de padronização codificação e nível de detalhamento dos pacotes de trabalho, foram disseminados desde os fornecedores até as frentes de serviço. Aplicativos desenvolvidos por uma equipe de engenharia digital integrados ao BIM/IoT, permitiram o acompanhamento em tempo real dos pacotes de

instalação (IWP's). O *Look Ahead Planning*, (*Pull Planning*, Programação semanal, *Check-in/Check out*, retrospectivas, visitas no campo) otimizou as rotinas de campo com a digitalização e o acompanhamento online das restrições.

Ao final, as diretrizes foram discutidas em uma sessão de fechamento da prática, direcionada aos membros das equipes. Nessas sessões foram obtidos *feedbacks*, opiniões e pontos de vistas abrangentes sobre a implementação das metodologias, além de identificar pontos de melhoria e necessidades de treinamentos e/ou habilidades relacionadas ao trabalho.

5. Considerações Finais

A partir do levantamento do estado da arte e do estudo de caso para entendimento geral da adoção do BIM e AWP no contexto do VDC, pode-se traçar algumas considerações finais. A adoção de tecnologias digitais na indústria da construção se apresenta como uma oportunidade para promover inovações no ambiente construído, sendo necessário a adequação das empresas ao cenário atual. A gestão de projetos complexos, a partir de estratégias e tecnologias digitais, podem trazer mais transparência, previsibilidade, melhorar a qualidade e a segurança cumprindo o cronograma e as estimativas de custos, além de reduzir desperdícios e retrabalhos. O VDC transcende a utilização das tecnologias digitais ao incorporar o propósito trazido à luz pelos objetivos do cliente e do projeto. No contexto das construções sustentáveis os esforços empreendidos pelas organizações precisam ir além da lucratividade e necessitam superar as barreiras culturais. A engenharia tem um papel importante na elaboração das informações e da documentação técnica para o uso das metodologias BIM e AWP. Ao incorporar conceitos de *Lean Construction*, como em uma “linha de produção” são reduzidos os desperdícios e o volume de materiais. Ainda existe uma lacuna entre empresas projetistas e fornecedores, com relação a maturidade digital dificultando a interoperabilidade das informações. As rotinas de lideranças e operacionais (ICE) contribuem para a colaboração das partes interessadas e o comprometimento das equipes. A adoção de aplicativos conectados por IoT permite a troca de informações em tempo real e um melhor acompanhamento dos pacotes de instalação. Os modelos de gestão em VDC podem proporcionar uma mudança de mentalidade das lideranças. Torna-se importante definir e monitorar o progresso do projeto ao longo dos objetivos de produção por métricas e planos de ação. A disponibilidade de recursos e as restrições, juntamente com a gestão ambiental, são práticas estratégicas (PPM), pois buscam a redução do desperdício, a eficiência organizacional e a sustentabilidade das construções.

Percebe-se ainda que a transformação digital não depende apenas das tecnologias como o BIM, IoT, o AWP e o VDC, ela é uma estrutura viva que deve evoluir enquanto mantém seus princípios e conceitos fundamentais. As aplicações tecnológicas precisam evoluir pelas novas tendências sobretudo na busca por melhoria dos processos de gerenciamento de produção (PPM) e capacitação das pessoas, isso permite a condução de uma engenharia simultânea integrada (ICE) onde todos estejam engajados, inclusive às comunidades locais, em um objetivo comum rumo ao crescimento sustentável.

Destaca-se ainda, que este estudo teve como objetivo avaliar o nível de adoção das tecnologias BIM e AWP em uma planta de mineração e os resultados podem ser limitados até certo ponto, devido ao tamanho do projeto. Também se ressalta os impactos causados pela pandemia de Covid 2019, que impôs mudanças significativas na forma de interação entre as pessoas e pela necessidade de adoção acelerada de tecnologia para colaboração remota. Entretanto, as diretrizes aqui apresentadas podem ser utilizadas para estabelecer uma referência de compreensão geral para adoção das práticas de BIM, AWP e VDC em outros projetos em regiões do Brasil.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Vale, AtkinsRéalis e a Verum Partners pelo suporte técnico na construção deste artigo, e ao CNPq, CAPES, FAPEMIG, pelo apoio a pesquisa.

Referências

- [1] S. Gao, F. Meng, Z. Gu, Z. Liu, and M. Farrukh, “Mapping and Clustering Analysis on Environmental, Social and Governance Field a Bibliometric Analysis Using Scopus,” *Sustainability*, vol. 13, no. 13, p. 7304, Jun. 2021, doi: 10.3390/su13137304.
- [2] D. H. Meadows, J. Randers, and D. Meadows, *Limites do crescimento: um relatório para o Projeto do Clube de Roma sobre o Dilema da Humanidade*, 2 ed. São Paulo: Perspectiva, 1978.
- [3] United Nation, “The 17 Goals: Sustainable Development.” Accessed: Jan. 26, 2024. [Online]. Available: <https://sdgs.un.org/goals>
- [4] Infrastructure Sector Market Size & Share Analysis, “Growth Trends & Forecasts (2024 - 2029)”, Accessed: Jan. 26, 2024. [Online]. Available: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/infrastructure-sector>
- [5] S. Andersson *et al.*, “Sustainable development—Direct and indirect effects between economic, social, and environmental dimensions in business practices,” *Corp Soc Responsib Environ Manag*, Mar. 2022, doi: 10.1002/csr.2261.
- [6] S. Chen, Y. Song, and P. Gao, “Environmental, social, and governance (ESG) performance and financial outcomes: Analyzing the impact of ESG on financial performance,” *J Environ Manage*, vol. 345, p. 118829, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.118829.
- [7] K. Liu, Q. Meng, Q. Kong, and X. Zhang, “Review on the Developments of Structure, Construction Automation, and Monitoring of Intelligent Construction,” *Buildings*, vol. 12, no. 11, p. 1890, Nov. 2022, doi: 10.3390/buildings12111890.
- [8] A. G. Di Stefano, M. Ruta, and G. Masera, “Advanced Digital Tools for Data-Informed and Performance-Driven Design: A Review of Building Energy Consumption Forecasting Models Based on Machine Learning,” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 24, p. 12981, Dec. 2023, doi: 10.3390/app132412981.
- [9] H. N. Rafsanjani and A. H. Nabizadeh, “Towards digital architecture, engineering, and construction (AEC) industry through virtual design and construction (VDC) and digital twin,” *Energy and Built Environment*, vol. 4, no. 2, pp. 169–178, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.enbenv.2021.10.004.
- [10] A. C. Gil, *Como Elaborar Projetos de Pesquisa*, 7ª Ed. Atlas Exatas, Humanas, Soc (Grupo Gen), 2022.
- [11] M. Feferbaum, *Metodologia da Pesquisa em Direito: técnicas e abordagens para elaboração de monografias, dissertações e teses.*, 3ª Edição. Saraiva Jur, 2022.
- [12] M. Hanisch, “Prescriptive Theorizing in Management Research: A New Impetus for Addressing Grand Challenges,” *Journal of Management Studies*, Jan. 2024, doi: 10.1111/joms.13035.
- [13] M. M. Feliciano-Cestero, N. Ameen, M. Kotabe, J. Paul, and M. Signoret, “Is digital transformation threatened? A systematic literature review of the factors influencing firms’ digital transformation and internationalization,” *J Bus Res*, vol. 157, p. 113546, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.jbusres.2022.113546.
- [14] V. Alcácer and V. Cruz-Machado, “Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems,” *Engineering Science and Technology, an*

- International Journal*, vol. 22, no. 3, pp. 899–919, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.jestch.2019.01.006.
- [15] M. M. Queiroz, S. Fosso Wamba, M. C. Machado, and R. Telles, “Smart production systems drivers for business process management improvement,” *Business Process Management Journal*, vol. 26, no. 5, pp. 1075–1092, Feb. 2020, doi: 10.1108/BPMJ-03-2019-0134.
- [16] M. Rachinger, I. Korajman, and C. Ropposch, *Systematic literature review of business model innovation in business ecosystems*. 2019.
- [17] ONU, “Organização das Nações Unidas. ONU News, Perspectiva Global Reportagens Humanas,” *Desenvolvimento Econômico*, 2019, Accessed: Jan. 20, 2024. [Online]. Available: <https://news.un.org/pt/story/2019/04/1666621>
- [18] IPA, “Transforming Infrastructure Performance Roadmap to 2030,” 2021. Accessed: Jan. 20, 2024. [Online]. Available: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1016726/IPA_TIP_Roadmap_to_2030_v6_1.pdf
- [19] J. Weking, M. Stöcker, M. Kowalkiewicz, M. Böhm, and H. Krcmar, “Leveraging industry 4.0 – A business model pattern framework,” *Int J Prod Econ*, vol. 225, p. 107588, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.ijpe.2019.107588.
- [20] S. Gierej, “The Framework of Business Model in the Context of Industrial Internet of Things,” *Procedia Eng*, vol. 182, pp. 206–212, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.03.166.
- [21] R. Woodhead, P. Stephenson, and D. Morrey, “Digital construction: From point solutions to IoT ecosystem,” *Autom Constr*, vol. 93, pp. 35–46, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.autcon.2018.05.004.
- [22] R. Sacks, C. EASTMAN, G. Lee, and P. Teicholz, *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers*, 3rd ed. 2018.
- [23] R. Teulier and M. Bagieu, *Building Information Modeling: Shared Modeling, Mutual Data, the New Art of Building*. Wiley, 2024. [Online]. Available: <https://books.google.com.br/books?id=q1XrEAAAQBAJ>
- [24] L. Li, J. Yuan, M. Tang, Z. Xu, W. Xu, and Y. Cheng, “Developing a BIM-enabled building lifecycle management system for owners: Architecture and case scenario,” *Autom Constr*, vol. 129, p. 103814, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.autcon.2021.103814.
- [25] S. Aram and C. Eastman, “Integration of PLM Solutions and BIM Systems for the AEC Industry,” Aug. 2013. doi: 10.22260/ISARC2013/0115.
- [26] Y. Zhang, X. Jiang, C. Cui, and M. Skitmore, “BIM-based approach for the integrated assessment of life cycle carbon emission intensity and life cycle costs,” *Build Environ*, vol. 226, p. 109691, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109691.
- [27] A. Nikologianni, M. Mayouf, and S. Gullino, “Building Information Modelling (BIM) and the impact on landscape: A systematic review of evolvments, shortfalls and future opportunities,” *Cleaner Production Letters*, vol. 3, p. 100016, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.clpl.2022.100016.
- [28] S. Tang, D. R. Shelden, C. M. Eastman, P. Pishdad-Bozorgi, and X. Gao, “A review of building information modeling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: Present status and future trends,” *Autom Constr*, vol. 101, pp. 127–139, May 2019, doi: 10.1016/j.autcon.2019.01.020.
- [29] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, “Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660, Sep. 2013, doi: 10.1016/j.future.2013.01.010.

- [30] S. Aram and C. Eastman, “Integration of PLM Solutions and BIM Systems for the AEC Industry,” Aug. 2013. doi: 10.22260/ISARC2013/0115.
- [31] B. Dave, A. Buda, A. Nurminen, and K. Främling, “A framework for integrating BIM and IoT through open standards,” *Autom Constr*, vol. 95, pp. 35–45, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.autcon.2018.07.022.
- [32] D. Lee, G. Cha, and S. Park, “A study on data visualization of embedded sensors for building energy monitoring using BIM,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 17, no. 6, pp. 807–814, Jun. 2016, doi: 10.1007/s12541-016-0099-4.
- [33] C. Z. Li, F. Xue, X. Li, J. Hong, and G. Q. Shen, “An Internet of Things-enabled BIM platform for on-site assembly services in prefabricated construction,” *Autom Constr*, vol. 89, pp. 146–161, May 2018, doi: 10.1016/j.autcon.2018.01.001.
- [34] W. W. B. Sodré, “Tecnologia BIM: A importância do decreto 10306 na democratização da metodologia no país,” *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, pp. 66–85, Dec. 2021, doi: 10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/decreto-10306.
- [35] Y. S. Halala and A. R. Fayek, “A framework to assess the costs and benefits of advanced work packaging in industrial construction,” *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 46, no. 3, pp. 216–229, 2019, doi: 10.1139/cjce-2018-0072.
- [36] A. Shamshiri, K. R. Ryu, and J. Y. Park, “Text mining and natural language processing in construction,” *Autom Constr*, vol. 158, p. 105200, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.autcon.2023.105200.
- [37] O. Hamdi, “Advanced Work Packaging from project definition through site execution: driving successful implementation of WorkFace Planning,” Master of Science in Engineering, University of Texas, 2013. [Online]. Available: <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/21384>
- [38] CII, “Construction Industry Institute and Construction Owners Association (COAA) Joint Venture A Summary of the Construction Industry Institute - RS-272 Studies on Work Packaging Increased Safety , Productivity , and Predictability,” 2013.
- [39] AWP Institute, “Advanced Work Packaging Open Knowledge Base .” Accessed: Jan. 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.workpackaging.org/single-post/advanced-work-packaging>
- [40] C. P. Schimanski, G. P. Monizza, C. Marcher, and D. T. Matt, “Conceptual foundations for a new lean BIM-based production system in construction,” *27th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, IGLC 2019*, no. July, pp. 877–888, 2019, doi: 10.24928/2019/0106.
- [41] E. S. SCOTT HOOD, E. L. ISATTO, and C. T. FORMOSO, “Sistema Last Planner X Advanced Work Packaging,” *XI Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção*, vol. 11, no. 3, pp. 1–7, 2019.
- [42] P. Dallasega, E. Rauch, and C. Linder, “Industry 4.0 as an enabler of proximity for construction supply chains: A systematic literature review,” *Comput Ind*, vol. 99, pp. 205–225, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.compind.2018.03.039.
- [43] CIFE, “Center for Integrated Facility Engineering.” Accessed: Jan. 28, 2024. [Online]. Available: <https://cife.stanford.edu/>
- [44] R. Fosse, G. Ballard, and M. Fischer, “Virtual Design and Construction: Aligning BIM and Lean in Practice,” Jul. 2017, pp. 499–506. doi: 10.24928/2017/0159.
- [45] L. Da Xu, E. L. Xu, and L. Li, “Industry 4.0: state of the art and future trends,” *Int J Prod Res*, vol. 56, no. 8, pp. 2941–2962, Apr. 2018, doi: 10.1080/00207543.2018.1444806.

- [46] M. Aslam, Z. Gao, and G. Smith, “Integrated implementation of Virtual Design and Construction (VDC) and lean project delivery system (LPDS),” *Journal of Building Engineering*, vol. 39, p. 102252, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.jobbe.2021.102252.
- [47] L. Rischmoller, D. Reed, A. Khanzode, and M. Fischer, “Integration Enabled by Virtual Design & Construction as a Lean Implementation Strategy,” Jul. 2018, pp. 240–249. doi: 10.24928/2018/0521.
- [48] J. Kunz and M. Fischer, “Virtual design and construction,” *Construction Management and Economics*, vol. 38, no. 4, pp. 355–363, Apr. 2020, doi: 10.1080/01446193.2020.1714068.
- [49] Verum Partners and Vale, “Salobo III: O papel da gestão integrada na transformação cultural e digital,” *O Empreiteiro*, Mar. 2022. Accessed: Feb. 02, 2024. [Online]. Available: https://revistaoe.com.br/wp-content/uploads/2022/04/OE-586_WEB.pdf
- [50] Vale, “Vale informa capacidade de processamento de 32 Mtpa em Salobo.” Accessed: May 03, 2024. [Online]. Available: <https://vale.com/pt/w/vale-informa-capacidade-de-processamento-de-32-mtpa-em-salobo>

Spatial and temporal variability of precipitation in a mountainous watershed using weighted interpolation by distance and elevation

Variabilidade espaço-temporal de precipitações em uma bacia hidrográfica montanhosa utilizando interpolação ponderada por distancia e elevação

David de Andrade Costa^{1,2}, Yared Bayissa², Dhiego da Silva Sales¹, Rennan Mendes de Moraes dos Santos

Dias^{2,3}, Jader Lugon Junior¹, Antônio J. Silva Neto³, Raghavan Srinivasan²

1 Instituto Federal Fluminense, Campos, RJ, Brazil; david.costa@iff.edu.br

2 Department of Ecology and Conservation Biology, Texas A&M University, College Station, USA;

3 Department of Mechanical Engineering and Energy, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, RJ, Brazil;

Abstract

The aim of this study is to discretize precipitation through interpolation utilizing the inverse square of distance and elevation as weighting elements to represent the spatial and temporal variation of rainfall. This technique has proven to be highly effective in capturing precipitation variability by integrating distance and elevation data from 15 stations built from a network of 39 rain gauges clustered by subbasins, generating continuous time series from 2006 to 2022. Validation through the double mass method has confirmed the accuracy of these time series, all exhibiting a coefficient of determination greater than $R^2 = 0.99$. This approach has provided a detailed representation of rainfall patterns across the entire region, significantly advancing our understanding of spatial hydrological dynamics.

Keywords: regionalization; time series; data gap filling

Resumo

O objetivo deste estudo é discretizar as precipitações por meio de interpolação, utilizando o inverso do quadrado da distância e da elevação como elementos de ponderação para representar a variação espacial e temporal das chuvas. Esta técnica revelou-se altamente eficaz na representação da variabilidade das precipitações, ao integrar dados de distância e elevação de 15 estações construídas a partir de uma rede de 39 pluviômetros agrupados por sub-bacias para geração de séries temporais contínuas de 2006 a 2022. A validação por meio do método de dupla massa confirmou a precisão das séries temporais construídas, todas apresentando um coeficiente de determinação maior que $R^2 = 0,99$. Este enfoque proporcionou uma representação detalhada dos padrões de chuva em toda a região, contribuindo significativamente para o avanço de nossa compreensão da dinâmica hidrológica espacial.

Palavras-chave: regionalização; séries temporais; preenchimento de falhas

1. Introduction

Mountainous regions are crucial for natural resources, influencing water dynamics, vegetation distribution, soil erosion, and regional climate, primarily through precipitation and topography interaction. However, the topographic complexity of these areas presents unique challenges in understanding and modeling precipitation, requiring a detailed approach to capture its temporal and spatial variability [1, 2, 3]. One reason for studying precipitation in mountainous regions in detail is its direct influence on the availability of freshwater. Mountains act as large natural reservoirs, capturing and storing atmospheric moisture that turns into precipitation. This distribution varies greatly due to factors such as elevation, slope orientation, wind patterns, and local microclimates, being essential for estimating water availability [4, 5].

Furthermore, detailed analysis of precipitation is crucial for managing natural disaster risks. The rugged topography of mountains makes them susceptible to extreme events such as floods and landslides, triggered by intense precipitation, especially on saturated or unstable soils [6, 7]. This understanding is equally important for biodiversity since vegetation and wildlife depend on water, whose distribution is influenced by precipitation. Thus, the objective of this study is to discretize precipitation through interpolation using the inverse of the square of the distance and elevation as weighting elements to represent the spatial variability of precipitation for the period 2006-2022. Capturing the complexity of precipitation patterns in these areas enhances modeling and forecasting systems, enabling the development of sustainable strategies to promote the resilience of mountain communities and preserve these ecosystems.

2. Methods

2.1. Study area

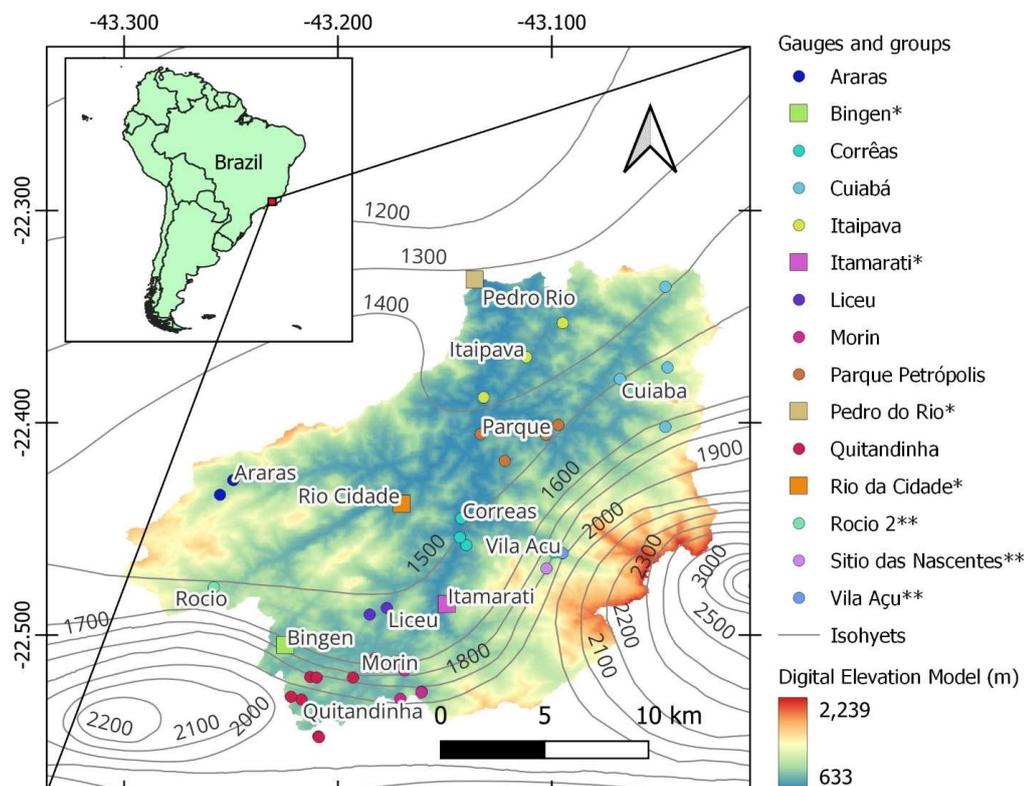


Figure 1: Precipitation gauges in the upper part of the Piabanha river basin. Source: prepared by the authors.
* Reference stations not grouped. ** Forest and agricultural stations not grouped.

The upper portion of the Piabanha watershed (Figure 1), located in Brazil, is a study area rich in physical elements that play a crucial role in regulating the local ecosystem. The region is marked by a mountainous topography with deep valleys and steep slopes. This complex topography directly influences the flow of water in the basin, determining drainage patterns. The climate is predominantly tropical of high-altitude, characterized by hot and humid summers and mild and drier winters. However, due to the influence of altitude and topography, there are significant microclimatic variations within the basin. Higher areas tend to be cooler and more humid, while lower areas are warmer and drier. These climatic variations have a direct impact on the distribution of vegetation in the region. Additionally, the water coming from the mountains is an important water supply source for the local population, agriculture and other economic activities in the area.

2.2. Precipitation discretization

There are many institutions monitoring the study region. The precipitation and flow gauges are mainly operated by the Brazilian National Water and Sanitation Agency (ANA). The Geological Survey of Brazil (SGB) operates the stations from EIBEX project (Integrated Studies in Experimental Watersheds) [8]. The State Environmental Institute (INEA) of Rio de Janeiro operates the precipitation and water level gauges related to their Flood Alert program. Additionally, the Brazilian National Center for Monitoring and Alerts of Natural Disasters (CEMADEN) operates precipitation and water level gauges for natural disaster alerts. The processing and consistency of the precipitation time series followed the methodological flow represented in Figure 2. In total, data from 39 pluviometers were used.

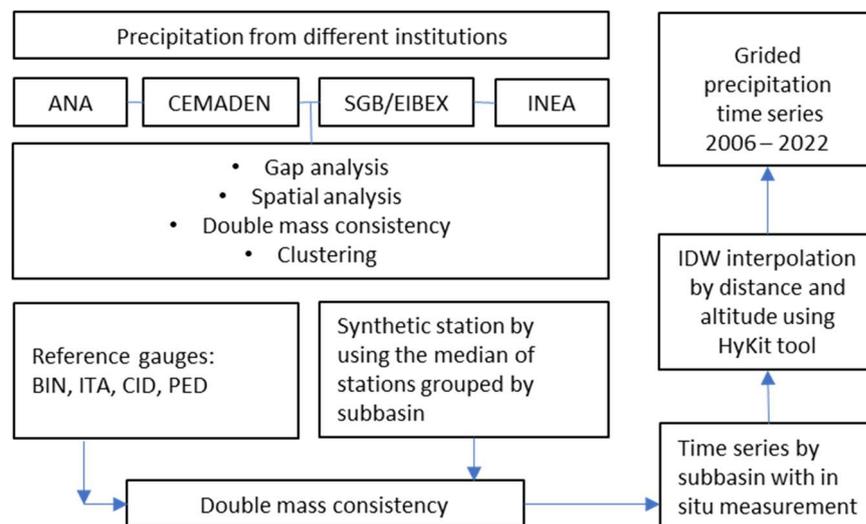


Figure 2: Methodological flow. Source: prepared by the authors.

Among the precipitation stations, four gauges operated by ANA stand out with the shortest periods of failure and were carefully consisted to serve as reference stations as they are situated within a homogeneous climatic region according to the Brazilian pluviometry atlas [9]. In order to check their consistency, the double-mass method was employed since it remains the most used technique for precipitation consistency [10]. According to Searcy & Hardison [11], this technique involves chronologically accumulating precipitation throughout the year and calculating the average accumulation of the stations under evaluation. Consequently, the accumulated precipitation of each station can be graphically plotted against the average

accumulated precipitation. A linear regression line is expected to be observed in the dataset if the stations are within a homogeneous region. If deviations indicating a change in slope are detected along the line, the reason for the data inconsistency must be investigated, and a new line should be adjusted for the detected period. If necessary, data adjustment for the inconsistent period should be performed by applying a correction factor based on the ratio of the slopes of the adjusted lines.

Synthetic stations were generated by the median of stations within the same subbasin (Figure 1) to mitigate measurement errors, where stations in the same location may exhibit discrepant readings. This approach also enables the construction of temporal series with fewer gaps, considering that rarely do all stations experience gaps simultaneously. The tool "HyKit: A Tool for Grid-based Interpolation of Hydrological Variables" [12, 13, 14] was employed to interpolating the stations using distance and elevation weighting (Equation 1).

$$\hat{p}_k = W_D \sum_{i=1}^N \frac{1}{D} w(d)_i p_i + W_z \sum_{i=1}^N \frac{1}{Z} w(z)_i p_i \quad (1)$$

$$w(d) = 1/d^a \quad \text{for } d > 0 \quad (2)$$

$$w(z) = \begin{cases} 1/z_{min}^b & \text{for } z \leq z_{min} \\ 1/z^b & \text{for } z_{min} < z < z_{max} \\ 0 & \text{for } z > z_{max} \end{cases} \quad (3)$$

Where, \hat{p} is the interpolated precipitation for a grid cell, W_D and W_z are the importance factors for distance and elevations, respectively, p_i is the precipitation value in mm/d of the i^{th} gauge station and N is the number of gauges that are used in the interpolation for the current grid cell. Similarly, $w(d)_i$ and $w(z)_i$ are the individual gauge weighting factors for distance and elevation, respectively, and D and Z are the normalization quantities given by the sum of individual weighting factors $w(d)$ and $w(z)$, respectively, for all the gauges used. The weighting factors $w(d)_i$ and $w(z)_i$ based on inverse of distance and elevation are given by Equation 2-3, where, d is the distance in kilometers between the current grid and the gauge station used for interpolation, z is the absolute elevation difference in meters between the current grid cell and the gauge station used for interpolation, a and b are exponent factors for distance and elevation weightings, respectively. The exponents (a and b) and the weighting factors are dimensionless numbers, z_{min} and z_{max} , expressed in meters, are the minimum and maximum limiting values of elevation differences for computing elevation weightings.

The digital elevation model (DEM) was obtained from NASA [15] and resampled to 90 meters using the resampling tool available in SAGA [16] (System for Automated Geoscientific Analyses). Raster subbasins were created using QGIS software, as the HyKit tool enables the creation of temporal series based on the mean pixel values contained within subbasins. Both the DEM and subbasin files were subsequently converted to ASC files using the translate tool (convert format) in GDAL (Geospatial Data Abstraction Library), also available in QGIS software. The stations were interpolated using the inverse distance squared and elevation method, resulting in a precipitation dataset without gaps for all subbasins. Subsequently, the synthetic stations were validated using the double mass method [11], with reference to previously consisted stations: Bingen, Itamarati, Rio da Cidade, and Pedro do Rio.

3. Results and Discussions

The hydrological stations Pedro do Rio, Bingen, Itamarati, and Rio da Cidade, operated by the National Water Agency (ANA), exhibited a strong Pearson linear correlation (r), ranging from $r = 0.78$ between Bingen and Pedro do Rio, to $r = 0.93$ between Bingen and Itamarati, as

well as between Rio da Cidade and Pedro do Rio. Precipitation variability was very well represented using the HyKit tool. The method applied both distance and elevation for 15 stations derived from a network of 39 precipitation gauges clustered by subbasins. The stations are situated at distances ranging from 1 to 20 kilometers from each other, with elevations ranging between 700 and 1500 meters above sea level. These stations were individually validated through the double mass method, all exhibiting a coefficient of determination greater than $R^2 = 0.99$ (Figure 3). This approach has provided a detailed depiction of rainfall patterns across the region, significantly enhancing our understanding of hydrological dynamics, as illustrated in Figure 4 and 5. Our results corroborate with Sirisena et al. [13], who employed the HyKit tool as a preprocessing step for modeling streamflow and sediment supply under climate changing conditions, achieving improved discretization of precipitation, thereby enabling a more accurate representation of hydrological modeling.

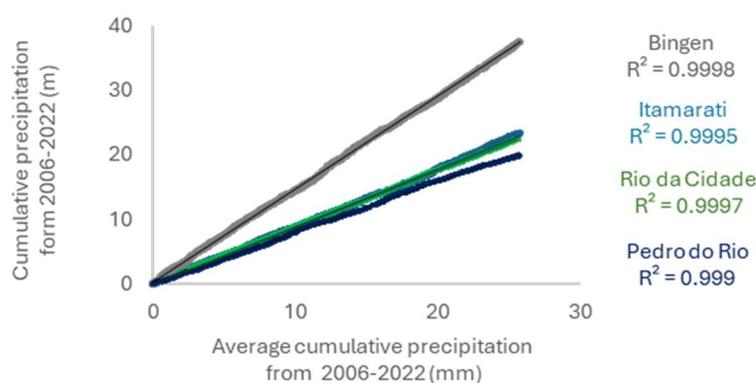


Figure 3: Double mass plot comparing cumulative precipitation among the reference stations: Bingen, Itamarati, Rio da Cidade, and Pedro do Rio. Horizontal axis denotes average cumulative precipitation across all stations, while vertical axis represents cumulative precipitation for individual stations. Source: prepared by the authors.

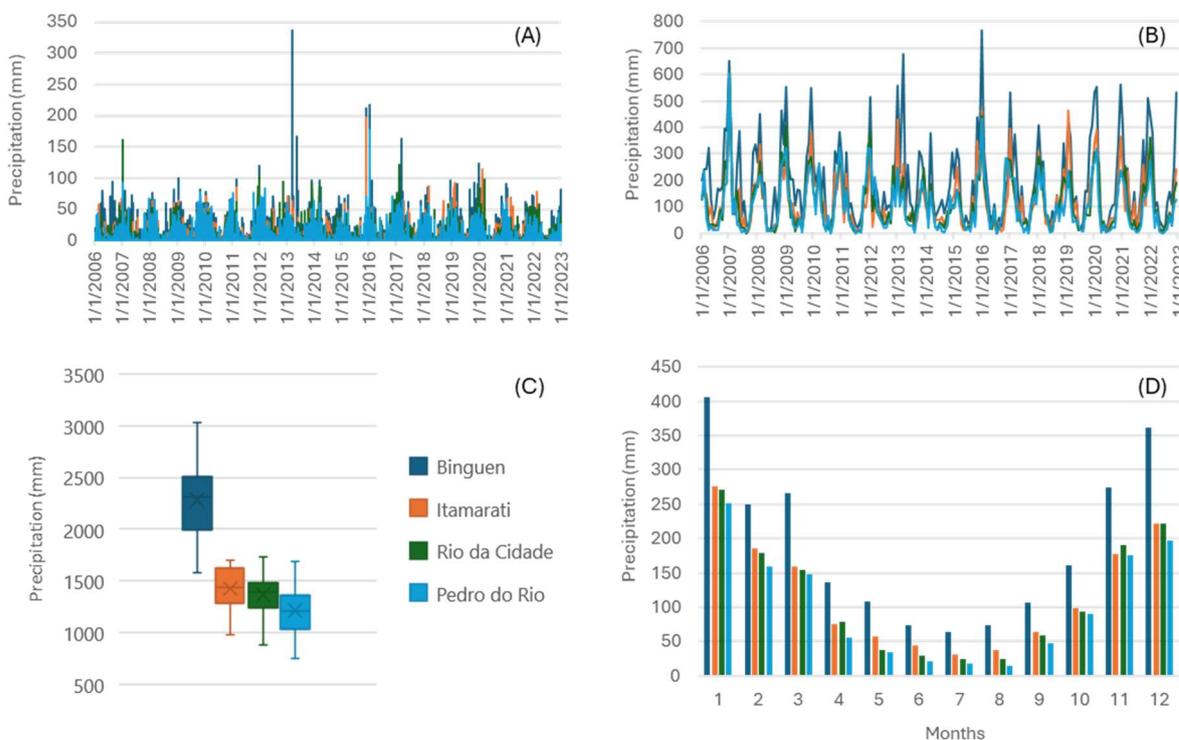


Figure 4: Reference stations. A) Daily precipitation time series; B) Monthly precipitation time series; C) Annual precipitation; and D) Average monthly precipitation. Source: prepared by the authors.

During the consistency process, some extreme values were identified. At the reference station Bingen/ANA, a precipitation of 335.7 mm was recorded on 03/18/2013, while the other reference stations, Itamarati, Rio da Cidade, and Pedro do Rio, recorded 63.7 mm, 36.3 mm, and 7.9 mm, respectively. This suggests widespread precipitation across the basin, with more intensity in the higher regions. To validate these extreme values, data from neighboring stations were also examined. It was found that the Coronel Veiga station, operated by INEA, recorded a precipitation of 347.7 mm on the same date, corroborating the extreme values recorded at both stations. However, on 07/02/2013, Bingen/ANA recorded a precipitation of 188.6 mm, while neighboring stations, Bingen/INEA and Coronel Veiga/INEA, recorded 20.7 mm and 34.7 mm, respectively. In this case, the arithmetic mean of these gauges was used to correct the value of 188.6 mm to 27.7 mm. On 07/02/2013, Bingen/ANA recorded 211.0 mm, consistent with records of 154.6 mm in Alto da Serra/CEMADEN and 198.6 mm in Itamarati/ANA. Additionally, on 01/15/2016, a precipitation of 218.3 mm was recorded in Bingen/INEA, consistent with a record of 136.7 mm in Alto da Serra/CEMADEN. Consequently, the four ANA stations were considered consistent and selected as reference for the other stations in the basin. Daily, monthly, and annual precipitation can be observed in Figure 4.

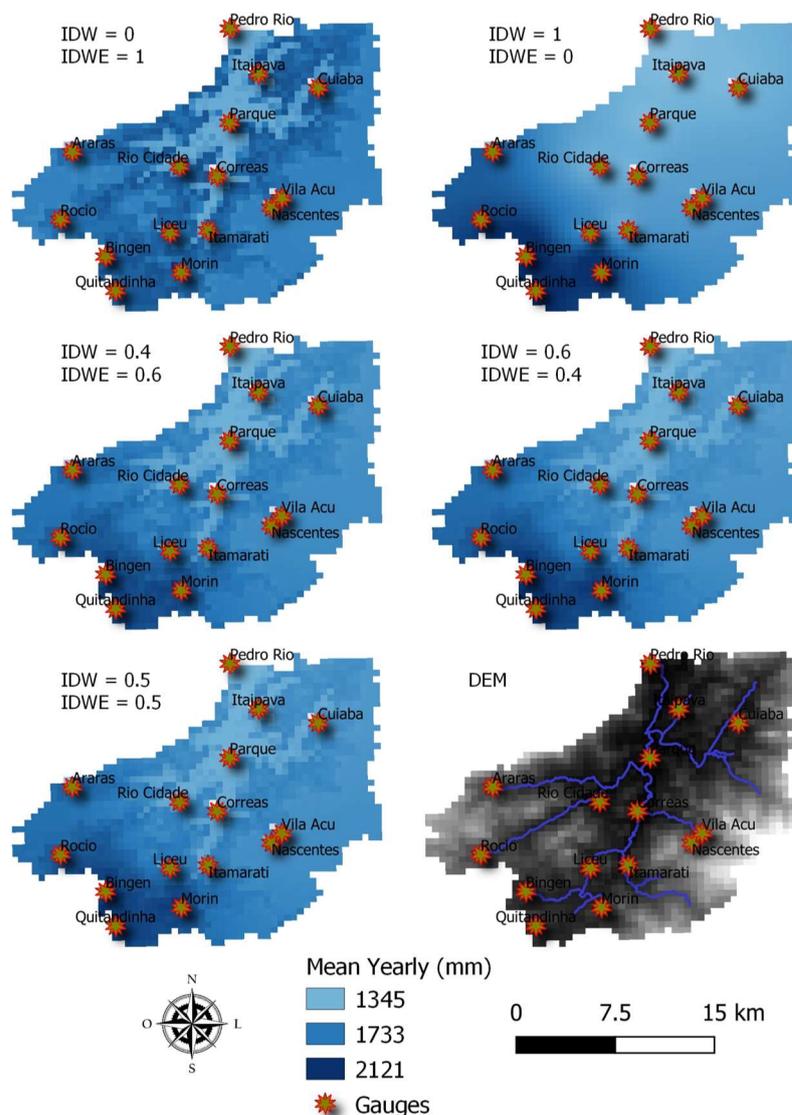


Figure 5: Interpolated annual precipitation using different weights for distance (IDW) and elevation (IDWE). Source: prepared by the authors.

Among 39 available precipitation stations, 32 were utilized to construct 8 synthetic stations (Figure 4) by calculating the median precipitation value from stations within the same subbasin. Additionally, 4 stations were used as reference stations, and 3 stations from experimental basins were used without grouping. This resulted in a total of 15 precipitation time series used as input data for the HyKit tool. For instance, the Quitandinha River subbasin has 7 precipitation gauges, but their data period ranges from 2011 to 2022, with all stations exhibiting significant non-coincident data gaps. Therefore, by adopting the median of the stations, a gap-free series starting from 2011 could be constructed. However, the reference stations have more extensive data series, some dating back to the 1930s, but we limited our analysis from the year 2006 onwards.

The HyKit tool was tested by assigning different weights for interpolation between distance (IDW) and elevation (IDWE) (Figure 5). However, based on literature [8, 9, 10], the configuration that assigns equal weights to distance and elevation was selected. The spatial distribution of precipitation shows higher rainfall in the higher regions of the basin, consistent with the adopted reference stations, indicating a good fit of the interpolation. Similarly, the lower regions of the basin exhibit lower precipitation. Thus, the inclusion of elevation as a weighting factor proves to be important for mountainous regions. This corroborates with literature [17], since the distance weighting method has demonstrated superior performance compared to several other standard methods of regionalizing precipitation.

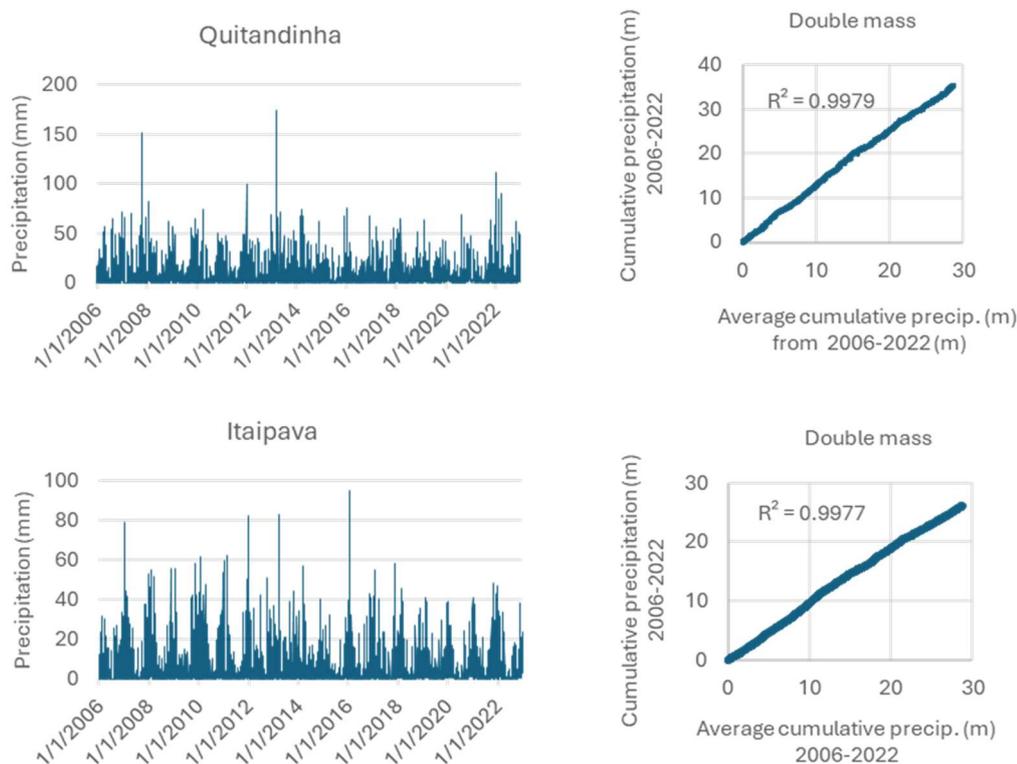


Figure 6: Synthetic stations interpolation by distance and altitude. Source: prepared by the authors.

After the interpolation process, all stations were validated using the double mass method in comparison with the reference stations mean. For instance, the interpolation for the Quitandinha River basin and a subbasin in the Itaipava region (Figure 6) generated a continuous series from 2006 to 2022, and their consistency through the double mass method showed coefficients of determination exceeding $R^2 = 0.99$, indicating an excellent fit. For the generated time series, all

precipitation events exceeding 100.0 mm were individually inspected and confirmed based on other stations. The same analysis was conducted for all other stations (Figure 5), which also exhibited coefficients of determination exceeding 0.99. Our study is consistent with the approach of Arikan and Kahya (2019) [11], who utilized double mass curves to assess consistency and apply corrections to their time series data. They employed a minimum of four stations to calculate the average cumulative precipitation, which aligns with our study.

3. Conclusion

The main objective of this study was to discretize precipitation through interpolation, utilizing the inverse square of distance and elevation as weighting elements to represent the spatial variation of rainfall. We applied the HyKit tool to perform the interpolation process, this technique proved highly effective in representing precipitation variability. By incorporating both distance and elevation data from 15 stations built from a network of 39 precipitation gauges clustered by subbasins, this method yielded accurate results. Validation via the double mass method confirmed the precision of these stations, with all exhibiting a coefficient of determination greater than $R^2 = 0.99$. This approach offered a detailed depiction of rainfall patterns across the region, significantly advancing our understanding of spatial hydrological dynamics. In addition, constructing synthetic stations by averaging precipitation data from different gauges within the same subbasin has proven effective in building time series with fewer gaps and greater reliability. Our findings underscore the importance of precipitation discretization, particularly in mountainous regions. Hydrologists and practitioners stand to benefit significantly from this approach to perform precipitation interpolation based on distance and elevation, facilitating more accurate assessments and predictions in complex terrain. Future work could focus on employing alternative interpolation techniques for comparison and performance analysis.

Acknowledgements

The authors acknowledge the financial support provided by the following Brazilian agencies: FAPERJ, Carlos Chagas Filho Foundation for Research Support of the State of Rio de Janeiro; CNPq, National Council for Scientific and Technological Development; and CAPES, Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel (Finance Code 001). We extend our acknowledgement to Texas A&M University for hosting the first author.

References

- [1] L. C. Gomes, F. J. J. A. Bianchi, I. M. Cardoso, R. P. O. Schulte, R. B. A. Fernandes, and E. I. Fernandes-Filho, "Disentangling the historic and future impacts of land use changes and climate variability on the hydrology of a mountain region in Brazil," *J. Hydrol.*, vol. 594, p. 125650, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125650.
- [2] A. T. Silva, J. Lugon Junior, and W. R. Telles, "Estimating Extreme Rainfall Equation Parameter in Southeast Brazil Using Machine Learning," *Rev. Gestão Soc. e Ambient.*, vol. 18, no. 4, p. e05153, Mar. 2024, doi: 10.24857/rgsa.v18n4-097.
- [3] L. N. N. de Souza, J. Lugon, and V. de Paulo Santos de Oliveira, "Influence of Climate Change on Precipitation and the Formulation of Rain Design in Brazil," *Fronteiras*, vol. 12, no. 1, pp. 10–21, 2023, doi: 10.21664/2238-8869.2023V12I1.P10-21.
- [4] X. Zhang, M. Xu, S. Kang, H. Wu, and H. Han, "The spatiotemporal variability in

- precipitation gradients based on meteorological station observations in mountainous areas of Northwest China,” *Theor. Appl. Climatol.*, vol. 155, no. 1, pp. 163–186, Jan. 2024, doi: 10.1007/s00704-023-04618-7.
- [5] D. S. Sales, J. L. Junior, V. de P. S. de Oliveira, N. S. Ferreira, and A. J. Silva Neto, “Sensitivity analysis of atmospheric phenomena models for precipitation assessment on the Paraíba do Sul River Watershed,” *Ciência e Nat.*, vol. 44, p. e55, 2022, doi: 10.5902/2179460x66757.
- [6] D. S. Sales, J. Lugo Junior, V. P. S. Oliveira, and A. J. Silva Neto, “Rainfall Input From Wrf-Arw Atmospheric Model Coupled With Mohid Land Hydrological Model for Flow Simulation in the Paraíba Do Sul River-Brazil,” *J. Urban Environ. Eng.*, vol. 15, no. 2, pp. 188–203, 2021, doi: 10.4090/juee.20219.v15n2.188203.
- [7] J. A. Marengo, L. M. Alves, T. Ambrizzi, A. Young, N. J. C. Barreto, and A. M. Ramos, “Trends in extreme rainfall and hydrogeometeorological disasters in the Metropolitan Area of São Paulo: a review,” *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, vol. 1472, no. 1, pp. 5–20, Jul. 2020, doi: 10.1111/nyas.14307.
- [8] M. D. Villas-Boas, F. Olivera, and J. P. S. de Azevedo, “Assessment of the water quality monitoring network of the Piabonha River experimental watersheds in Rio de Janeiro, Brazil, using autoassociative neural networks,” *Environ. Monit. Assess.*, 2017, doi: 10.1007/s10661-017-6134-9.
- [9] CPRM, “Isoietas Médias Anuais de 1977 a 2006 na escala 1:5.000.000. In: Atlas Pluviométrico do Brasil,” Maceio, 2011. [Online]. Available: <https://www.sgb.gov.br/publique///Mapas-e-Publicacoes/Atlas-Pluviometrico-do-Brasil-1351.html>
- [10] A. A. dos Reis, A. Weerts, M. H. Ramos, F. Wetterhall, and W. dos S. Fernandes, “Hydrological data and modeling to combine and validate precipitation datasets relevant to hydrological applications,” *J. Hydrol. Reg. Stud.*, vol. 44, p. 101200, 2022, doi: 10.1016/j.ejrh.2022.101200.
- [11] J. K. Searcy and C. H. Hardison, *Double-Mass Curves*. Washington: United States Government Print Office, 1960. [Online]. Available: <http://dspace.udel.edu:8080/dspace/handle/19716/1592>
- [12] T. A. J. G. Sirisena, S. Maskey, R. Ranasinghe, and M. S. Babel, “Effects of different precipitation inputs on streamflow simulation in the Irrawaddy River Basin, Myanmar,” *J. Hydrol. Reg. Stud.*, vol. 19, no. April, pp. 265–278, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.ejrh.2018.10.005.
- [13] T. A. J. G. Sirisena, S. Maskey, J. Bamunawala, E. Coppola, and R. Ranasinghe, “Projected streamflow and sediment supply under changing climate to the coast of the kalu river basin in tropical sri lanka over the 21st century,” *Water (Switzerland)*, vol. 13, no. 21, 2021, doi: 10.3390/w13213031.
- [14] S. Maskey, “HyKit: A Tool for Grid-based Interpolation of Hydrological Variables,” Delft, The Netherlands, 2013.
- [15] JPL/NASA, “NASADEM Merged DEM Global 1 arc second V001,” California, 2020. doi: https://doi.org/10.5067/MEaSURES/NASADEM/NASADEM_HGT.001.
- [16] O. Conrad *et al.*, “System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4,” *Geosci. Model Dev.*, vol. 8, no. 7, pp. 1991–2007, Jul. 2015, doi: 10.5194/gmd-8-1991-2015.
- [17] I. Masih, *Understanding hydrological variability for improved water management in the Semi-Arid Karkheh basin, Iran*. The Netherlands: CRC Press/Balkema, 2011.

Avaliação experimental do impacto da utilização de agregados reciclados de resíduos da construção civil em matrizes cimentícias

Experimental evaluation of impact of using recycled aggregates from construction waste in cement matrices

Laura Viana de Melo, Engenheira Civil, UFMG.

lauravianademelo03@gmail.com

Thiago Ewerton Cobra de Castro, estudante de graduação em Engenharia Civil, UFMG.

thiagoeccastro@ufmg.br

Paulo Henrique Vaz da Silva, Mestre em Construção Civil, UFMG.

pauloh.vazs@gmail.com

Fernando do Couto Rosa Almeida, professor adjunto do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, UFMG.

fernando@demc.ufmg.br

Resumo

O desenvolvimento de materiais alternativos para construção civil que possuam um fator ecológico é fundamental para garantir a sustentabilidade do setor. A utilização de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (RCD) em substituições parciais sob o agregado convencional se mostra uma alternativa para mitigar os efeitos negativos das atividades. Este estudo tem como intuito a avaliação das propriedades adquiridas por argamassas cimentícias confeccionadas com agregado miúdo reciclado oriundo de RCD, bem como os resultados obtidos pelos testes realizados com compósitos produzidos com teores de até 40% de substituição do agregado natural pelo reciclado. Apesar da leve perda de resistência à compressão e flexão, aumento da retração e da absorção de água do material endurecido, observou-se que os teores de substituição e tipo de agregados são determinantes para a melhoria das propriedades das argamassas.

Palavras-chave: agregado reciclado; resíduo de demolição; sustentabilidade.

Abstract

The development of alternative materials for civil construction that possess an ecological factor is essential to ensure the Sustainability of the sector. The use of recycled aggregates from construction demolition waste as partial replacements for conventional aggregates proves to be an alternative to mitigate the negative effects of activities. This study aims to evaluate the properties acquired by cementitious mortars made with fine recycled aggregate from CDW, as well as the results obtained from tests conducted with composites produced with levels of up to 40% substitution of natural aggregate by recycled aggregate. Despite the slight loss of compressive and flexural strength, increased shrinkage and water absorption of the hardened material, it was observed that the substitutuoin levels and type of aggregates are determining factors for the improvement of mortar properties.

Keywords: recycled aggregate; demolition waste; sustainability.

1. Introdução

A construção civil no Brasil é um dos setores mais relevantes para a economia, representando números expressivos para o desenvolvimento do país. Em 2023, foi responsável por 6,05% dos trabalhos formais [1], além do desenvolvimento da infraestrutura de cidades. Apesar dos benefícios oriundos da construção civil, suas atividades promovem impactos ambientais negativos significativos. Principalmente no que tange às matérias-primas utilizadas, em que cerca de 41% do PIB do setor é proveniente da indústria e comércio de materiais, sendo esta a maior fatia após a atividade da construção propriamente dita [1].

A extração de materiais para construção civil engloba a utilização de matérias-primas diversas, como minerais e solos [2]. No Brasil, o uso de areias, cascalhos, saibros, argilas, calcários, rochas britadas, rochas ornamentais e de revestimento podem ser utilizados para produção de cimentos, agregados, cerâmicas, dentre outros [3]. Para isso, são utilizadas quantidades significativas de energia, insumos industriais, tempo e logística, o que promove impactos ambientais relevantes, especialmente nas localidades em que estão inseridas. Além disso, a produção de concretos, o principal material de construção, demanda alta energia, danifica paisagens naturais pela exploração de agregados, e gera poluentes gasosos responsáveis pelo efeito estufa na produção do cimento Portland [4], [5] e [6].

Outra fonte de impacto ambiental ocasionado pelas atividades de construção civil é a geração de resíduos provenientes de demolições, reformas e outros. Cerca de 47 milhões de toneladas de RCD foram geradas no Brasil, 40% de todo resíduo gerado nos centros urbanos em 2021 [7].

Nesse sentido, o desenvolvimento de fontes alternativas para substituir ou racionalizar o consumo de materiais convencionais por outros mais ecoeficientes se faz primordial para um impacto mais sustentável do setor. Estudos recentes têm mostrado a viabilidade técnica da utilização de resíduos de demolição de construção civil, em busca de reduzir o impacto desses materiais no meio ambiente. A produção de concretos e argamassas com esses resíduos foi avaliada em diversos estudos ([8], [9], [10]). Além disso, a normatização brasileira para o uso de resíduos de construção civil em aplicações não estruturais permite a substituição de até 20% do agregado natural pelo agregado reciclado ([11], [12]).

Diante disso, a utilização de resíduos de demolição de construção civil se mostra relevante para o equilíbrio ecológico do setor. O impacto se deve à reciclagem dos resíduos gerados nas atividades de demolição e na mitigação da degradação do meio ambiente para extrações de novas matérias-primas.

Este estudo visa avaliar as propriedades adquiridas por matrizes cimentícias com a incorporação de agregados reciclados alternativos, em substituições parciais do agregado convencional. Com isso, alguns parâmetros como resistência mecânica, retração por secagem e absorção de água são considerados para avaliação.

2. Metodologia

O presente estudo se baseou na elaboração de três traços diferentes para análise, sendo nomeados “CPV – R”, “CPV – 20” e “CPV - 40”. Foram utilizados para a pesquisa dois diferentes tipos de agregado miúdo, o natural e o reciclado. Como agregado natural foi utilizada areia quartzosa comercial, do tipo lavada com granulometria fina, e como agregado reciclado foi utilizado o material resultante da moagem de materiais cimentícios e tijolos cerâmicos, fornecido pela Superintendência de Limpeza Urbana (SLU). As proporções utilizadas estão na tabela abaixo.

Tabela 1: Quantidade de material por m³ de argamassa.

Amostra	Cimento (kg/m ³)	Areia Natural (kg/m ³)	Areia reciclada (kg/m ³)	Aditivo (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Relação água/cimento
CPV-R	579,68	1159,36	0	5,80	243,46	0,42
CPV-20	579,68	927,48	204,07	5,80	243,46	0,42
CPV-40	579,68	695,61	408,13	5,80	243,46	0,42

A moldagem dos corpos de prova seguiu a metodologia da NBR 7215 [13] e NBR 15116 [14]. Os agregados foram misturados em estado seco. Foi feito o procedimento de adensamento em mesa vibratória e a cura foi realizada em laboratório.

Para realização dos ensaios, foram moldados corpos de prova cilíndricos e prismáticos. A resistência mecânica à compressão seguiu as orientações da NBR 13279 [15], em amostras prismáticas (4 x 4 x 16 cm), para idades de 7, 28 e 91 dias.

A retração por secagem foi avaliada em amostras prismáticas (2,5 x 2,5 x 30 cm) com base na NBR 15261 [16], por um período de 120 dias. As medidas foram realizadas de modo intervalar nas idades de 1, 2, 3, 4, 7, 9, 11, 14, 21, 28, 35, 42, 49, 56, 63, 70, 77, 84, 91 e 120 dias.

Por fim, a absorção de água foi avaliada por ascensão capilar e por imersão, sob orientações da NBR 9779 [17] e NBR 9778 [18], respectivamente. As amostras foram feitas em formas cilíndricas (Ø 5x10 cm).

Com os resultados dos ensaios, é possível avaliar as características adquiridas pelo compósito à medida em que se insere substituições parciais de agregado reciclado sob o agregado natural.

3. Resultados e discussões

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para os ensaios experimentais das amostras.

3.1. Resistência mecânica

O comportamento da resistência mecânica à compressão e à tração são apresentados na tabela abaixo (Tabela 2). Em seguida, os gráficos para cada ensaio, Figura 1 e Figura 2, fornecem a visualização do comportamento das matrizes.

Tabela 2: Resultados para resistência à compressão e à tração e desvios.

Amostra	Idade	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração (MPa)
CPV-R	7	53,14±2,34	5,87±0,78
CPV-20	7	48,80±2,40	5,78±0,12
CPV-40	7	52,89±0,40	5,50±0,21
CPV-R	28	55,02±5,26	8,87±0,21
CPV-20	28	54,96±5,45	8,05±0,40
CPV-40	28	55,95±1,99	8,45±0,58
CPV-R	91	54,65±1,50	8,07±0,33
CPV-20	91	55,73±5,97	7,15±0,91
CPV-40	91	52,71±4,77	8,10±0,17

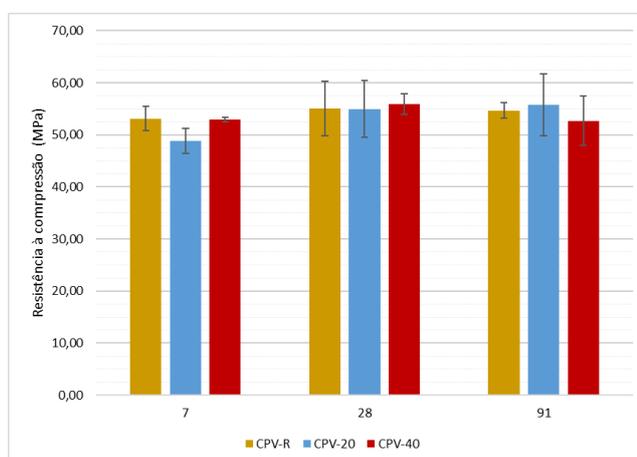


Figura 1: Resistência à compressão (MPa) em 7, 28 e 91 dias. Fonte: elaborado pelos autores.

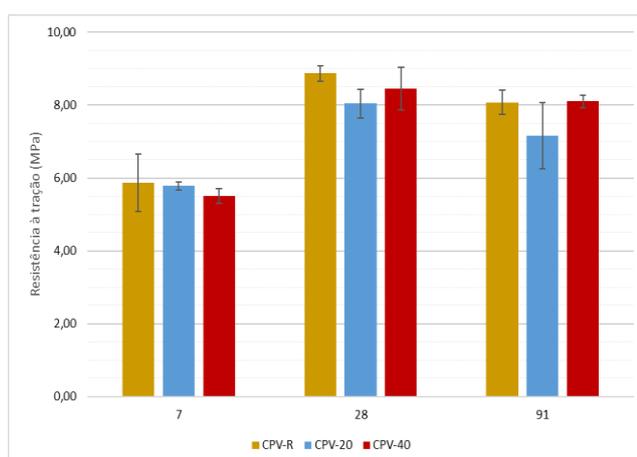


Figura 2: Resistência à tração (MPa) em 7, 28 e 91 dias. Fonte: elaborado pelos autores.

A utilização de RCC como agregado reciclado fino promoveu baixa influência no comportamento mecânico dos compósitos quando se compara a evolução das idades de 7, 28 e 91 dias. Tal fato se deve à utilização do cimento Portland de alta resistência inicial (CPV) usado neste programa experimental.

Quando se avalia a idade de 7 dias, o melhor desempenho foi para o traço "CPV-R", que obteve 53,14 MPa (resistência à compressão) e 5,87 MPa (resistência à flexão). Para os 28 dias, o "CPV-40" mostrou a maior resistência à compressão (55,95 MPa), enquanto o "CPV-R" alcançou a maior resistência à flexão (8,87 MPa). Para a idade mais avançada, ao fim do teste, aos 91 dias, a maior resistência à compressão foi de 55,73 MPa, para a amostra "CPV-20" e 8,10 MPa para a flexão na amostra "CPV-40".

As variações observadas dentro da mesma idade não são representativas uma vez que o intervalo máximo de resistência à compressão entre as amostras foi de 6%, 2% e 3%, respectivamente, para 7, 28 e 91 dias de cura, sendo que todos os valores estão dentro do desvio padrão. Isso mostra que as argamassas com e sem incorporação de RCC têm comportamento semelhante, independentemente da idade do teste.

No ensaio de resistência à flexão, ocorreu a redução dos valores obtidos para a substituição de 20% de agregado. Para as amostras com 0% e 40%, um comportamento semelhante foi identificado. A variação máxima dos resultados experimentais foi registrada em 6%, 9% e 11% para 7, 28 e 91 dias, respectivamente.

É válido ressaltar que os diferentes traços utilizaram a mesma relação água/cimento. Tal fato indica que a maior porosidade do agregado não foi capaz de alterar o comportamento de hidratação da pasta, tendo em vista a baixa alteração entre os resultados obtidos.

3.2. Retração

O comportamento da retração por secagem das amostras é demonstrado no gráfico da Figura 3.

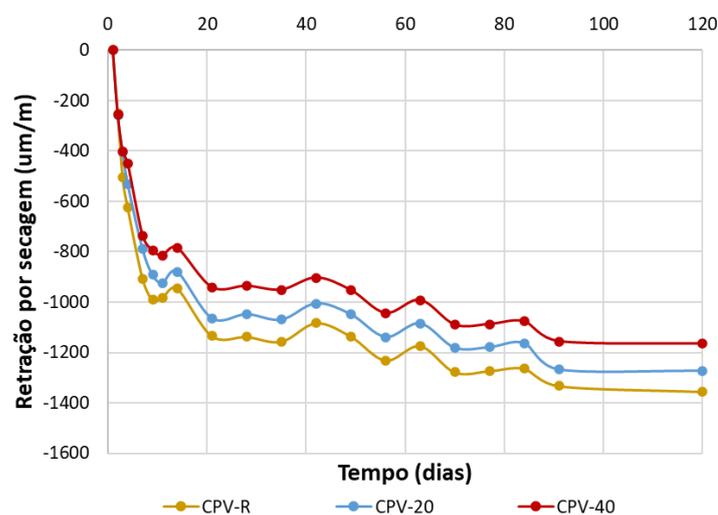


Figura 3: Retração por secagem em até 120 dias. Fonte: elaborado pelos autores.

Diante do observado, à medida em que se aumenta a idade analisada, a retração das matrizes aumenta. Há uma tendência de estabilização da curva por volta dos 100 dias de medição. Este fato está relacionado com a evaporação da água para o ambiente externo, que aumenta ao longo do tempo, levando à redução no volume total das amostras.

Tendo em vista o impacto do aumento da incorporação dos resíduos, quanto maior o nível de substituição menor a retração das amostras. No final do teste (aos 120 dias), os valores mais

altos foram registrados para a amostra "CPV-R" (1355 $\mu\text{m/m}$), seguidos pela amostra "CPV-20" (1273 $\mu\text{m/m}$), e então "CPV-40" (1165 $\mu\text{m/m}$).

3.3. Absorção de água

A evolução da absorção de água por capilaridade e por imersão está descrita na Tabela 3, respectivamente em g/cm^2 e %.

Tabela 3: Resultados para resistência à compressão e à tração e desvios.

Amostra	Absorção por capilaridade 28 dias (g/cm^2)	Absorção por capilaridade 91 dias (g/cm^2)	Absorção por imersão 28 dias (%)	Absorção por imersão 91 dias (%)
CPV-R	0,153 \pm 0,06	0,145 \pm 0,015	4,93 \pm 0,20	5,41 \pm 0,16
CPV-20	0,147 \pm 0,07	0,133 \pm 0,011	4,98 \pm 0,09	5,83 \pm 0,16
CPV-40	0,162 \pm 0,03	0,147 \pm 0,003	5,01 \pm 0,17	5,45 \pm 0,15

Para os resultados da absorção de água por capilaridade, observa-se que, à medida que o tempo de cura aumenta, ocorre redução nesse fenômeno. Em comparação, as variações negativas correspondem a 5% para a amostra "CPV-R" e 9% para "CPV-20" e "CPV-40". Isso está relacionado ao maior tempo de cura, que favorece a hidratação da pasta cimentícia. Além disso, as pressões internas são menores em caso de espaços disponíveis no interior da amostra, o que facilita a absorção de água.

Para os ensaios de absorção por imersão, os resultados mostram que há um aumento desse teor. Tal fato possui relação com os efeitos da retração por secagem, conforme demonstrado na Figura 3, em que ocorre o surgimento de microfissuras e porosidade das matrizes. Observa-se que a incorporação de 20% e 40% de agregado reciclado leva a uma redução e aumento da absorção de água capilar, respectivamente (para ambas as idades).

Em ambos os teores analisados, a absorção de água por imersão foi aumentada pelo agregado reciclado fino. Tal fato indica que o surgimento de porosidade no compósito está diretamente relacionado à presença de agregados porosos dos resíduos de construção e demolição. Isso está corretamente relacionado às propriedades dos agregados, que modificam a microestrutura do material de argamassa endurecido.

4. Conclusão

Com o desenvolvimento desta pesquisa, foi possível avaliar as propriedades adquiridas em matrizes cimentícias com a incorporação progressiva de agregados reciclados provenientes de resíduos de demolição da construção civil. Esta pesquisa se mostra relevante em um contexto em que a construção civil promove grandes impactos ambientais, tanto na produção de matéria-prima para agregados quanto na geração de resíduos de construção.

A utilização de agregados reciclados promoveu resultados de resistência à compressão da matriz cimentícia semelhantes aos obtidos na mistura com agregados convencionais. O maior resultado obtido foi de 55,95 MPa para a mistura "V-40-1", após 28 dias de cura. Isto é semelhante ao obtido na revisão da literatura.

Em relação à absorção de água, o agregado reciclado, em particular, apresenta maior percentual, o que está relacionado à sua estrutura porosa. Contudo, os níveis obtidos são aceitáveis aos limites normativos e obtêm correlações com outros estudos.

Quando incorporado à matriz, este material tem pouca influência, pois gera resultados semelhantes, para os testes realizados, entre os diferentes níveis de substituição de agregados aplicados. Em relação à argamassa fresca, sua consistência aumenta, o que pode impactar na sua trabalhabilidade.

Nesse sentido, a incorporação de resíduos de construção em matrizes cimentícias promove resultados semelhantes aos obtidos na referência aos materiais naturais. Portanto, a utilização deste material é viável e proporciona características e propriedades semelhantes aos compostos produzidos com agregado convencional.

Diante dos resultados da pesquisa, existe um gargalo promissor para a utilização de resíduos de construção civil em substituição aos agregados convencionais utilizados em matrizes cimentícias. Este é um avanço relevante, pois promove maior sustentabilidade para a construção civil, ao reduzir a extração de matérias-primas naturais e destinar adequadamente parte dos resíduos gerados em atividades como demolições, retrofits e reformas.

Referências

- [1] Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC). Disponível em: <https://cbic.org.br/construcao-revisa-projecao-de-crescimento-e-deve-fechar-2023-com-queda-de-05/>. Acesso em: 28/03/2024.
- [2] CRISTAL MINERAÇÃO. Mineração na construção civil. Disponível em: <https://cristaljr.com/mineracao-na-construcao-civil/>. Acesso em 16/03/2023.
- [3] LEI FEDERAL N° 16567-1978. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/16567.htm. Acesso em 16/03/2023.
- [4] RODRIGUES F.A., JOEKES, I. Cement industry: Sustainability, challenges and perspectives. *Environmental Chemistry Letters*, v 9, p.151–166, 2011 63
- [5] SCRIVENER, K. et al. Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a lowCO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, v. 114, p. 2- 26, 2018.
- [6] HABERT, G. ET AL. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nature Reviews Earth & Environment*, v.1, p. 559–573, 2020.
- [7] ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2021. São Paulo. [s.n.], 2022. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2021/>
- [8] JIMÉNEZ, J. R.; AYUSO, J.; LÓPEZ, M.; FERNÁNDEZ, J. M.; BRITO, J. Use of Fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing. *Construction and Building Materials*, v. 40, p. 679-690, Março 2013.
- [9] SANTOS, D. V.; CABRAL, A. E. B. Análise técnica da reciclagem de resíduos de construção em canteiro de obras. *Ambiente Construído*, v. 20, n. 3, p. 363–383, 2020. Acesso em: 25 mar. 2024.
- [10] SILVA, R.B., ANGULO, S.C., PILEGGI, R.G., and SILVA, C.O. Concretos secos produzidos com agregados de RCD separados por densidade. *Ambiente Construído*, v.15, n.4, p.335–349. 2015.

- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 15116: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland — Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2021.
- [12] CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA N° 307, de 5 de julho de 2002.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 7215: Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 2019.
- [14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15116: agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em concreto com cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.
- [15] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13279: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 15261: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005c.

Desenvolvimento e Calibração de Estação Climática de Baixo Custo *Development and Calibration of Low-Cost Climate Station*

Clarissa Sartori Ziebell, Doutora em Design, UFRGS

clarissa.ziebell@ufrgs.br

Marcos Rodrigues Vizzotto, Mestre em Engenharia Elétrica, UFRGS

marcos.vizzotto@ufrgs.br

Pedro Henrique Gonçalves, Doutor em Construção Civil, UFG

pedrogoncalves@ufg.br

Resumo

São muitas as pesquisas científicas que necessitam de coletas de dados climáticos. Contudo, a escassez de recursos financeiros muitas vezes pode ser um entrave da aquisição dos equipamentos necessários para tanto. Logo, esta pesquisa tem como objetivo desenvolver e calibrar um equipamento de baixo custo para medição de dados climáticos (temperatura e umidade). Para tanto, duas estações foram desenvolvidas utilizando a plataforma de desenvolvimento Arduino juntamente com sensores meteorológicos, sendo uma pensada para a coleta de dados em ambientes externos e a outra para a coleta de dados em ambientes internos. O processo de calibração durou aproximadamente 2 horas e foi realizada dentro de uma câmara climatizada por meio da comparação com os dados coletados em um equipamento de medição já calibrado. Com base nesta comparação, pôde-se ajustar os dados de saída disponibilizados pelas estações meteorológicas propostas. Ao final do trabalho obteve-se um coeficiente R^2 muito próximo a 1 para ambas as estações, o que indica que os sensores utilizados nas estações propostas são confiáveis. Contudo, a leitura dos gráficos leva a crer que para de fato validar o sensor da estação interna seria necessário um período maior de medição.

Palavras-chave: Estação de monitoramento climático; Calibração de sensores; Arduino Uno.

Abstract

There are many scientific studies that require climate data collection. However, the lack of financial resources can often be an obstacle to acquiring the necessary equipment for this purpose. Therefore, this research aims to assemble and calibrate low-cost equipment for measuring climate data (temperature and humidity). To this end, two stations were developed using the Arduino development platform together with meteorological sensors, one designed for data collection in external environments and the other for data collection in internal environments. The calibration process lasted approximately 2 hours and was carried out inside a climate-controlled chamber through comparison with data collected from already calibrated measuring equipment. Based on this comparison, it was possible to adjust the output data provided by the proposed meteorological stations. At the end of the work, an R^2 coefficient very close to 1 was obtained for both stations, which indicates that the sensors used in the proposed stations are reliable. However, reading the graphs leads us to believe that to actually validate the internal station sensor, a longer measurement period would be necessary.

Keywords: Climate monitoring station; Calibration; Arduino Uno.

1. Introdução

O monitoramento de dados climáticos é necessário em diversas áreas do conhecimento. Na agricultura, a chamada agrometeorologia em conjunto com a agronomia do solo pode embasar importantes decisões no que se refere ao gerenciamento de recursos agrícolas [1]. Como auxílio a prevenção de acidentes, o monitoramento da umidade relativa do ar pode alertar as autoridades competentes do risco de um incêndio eminente em regiões com construções em madeira [2]. Além disso, trata-se de um recurso essencial na prevenção de desastres naturais em áreas de risco, especialmente com o agravamento das mudanças climáticas [3]. Outro tópico frequentemente mencionado em trabalhos acadêmicos é o estudo da formação das ilhas de calor por meio do monitoramento [4]. A qualidade do ar, medida através da concentração da massa de partículas presentes no ar, também é mensurada através de estações de monitoramento, e é essencial para o controle da poluição [5] [6]. O monitoramento permite também a identificação da melhor tecnologia de módulos fotovoltaicos para uma determinada localidade [7]. Pode-se citar ainda a aplicação do monitoramento como base de validação de modelos de simulação, tanto na escala da edificação, quanto na escala do microclima [8] [9].

Independente da finalidade do monitoramento sempre haverá a necessidade de acesso à equipamentos, cujos custos muitas vezes impedem a atividade. Neste sentido, diversos são os trabalhos que estudam a precisão de equipamentos montados a partir de sensores de baixo custo, sendo que muitos deles utilizam a plataforma de desenvolvimento Arduino [10]. Pode-se citar, por exemplo, o trabalho de Farhat et al. (2017) [11], onde os autores apresentam um sistema de coleta de informações completas do clima para áreas específicas formadas a partir de duas estações de clima (interna e externa) integradas por meio de conexão sem fio. Trata-se de um sistema de internet das coisas, visto que os dados coletados são enviados para a internet [11]. Há também a pesquisa de Strigaro, Cannata e Antonovic (2019) [12], onde os autores desenvolveram um equipamento com sensores de temperatura, pressão e umidade do ar, precipitação, direção e velocidade do vento, umidade do solo e iluminância. Os dados coletados foram comparados com os de uma estação meteorológica localizada próxima ao local de estudo e demonstraram gerar resultados de qualidade. Similarmente há o trabalho de Carneiro (2022) [13], onde é apresentado um *datalogger* com nove sensores analógicos de umidade de solo, um sensor digital de vazão de água e um sensor digital ultrassônico. Novamente os resultados foram comparados a um equipamento comercial e apresentaram boa precisão [13]. No trabalho de Marques Filho, Rodrigues e Ponte (2021) [14] é apresentado um protótipo de *datalogger* para ser utilizado em ambiente agrícola. Mais uma vez o equipamento foi montado através da plataforma Arduino, e inclui sensores de luminosidade, umidade do solo, umidade do ar e temperatura. Os testes de funcionamento foram realizados em dois locais distintos durante um período de 24 horas. Segundo os autores, o protótipo apresentou uma redução de custo de 600 até 3000% em relação equipamentos semelhantes disponíveis no mercado.

Como base na pesquisa apresentada, define-se o objetivo desta pesquisa, que consiste em desenvolver e calibrar um equipamento de baixo custo para medição de dados climáticos (temperatura e umidade). Ambas as estações foram montadas através da plataforma Arduino. Busca-se assim incentivar a realização de pesquisas mesmo com baixos recursos financeiros.

A dificuldade de acesso a estações de medição é um grande empecilho para o desenvolvimento da pesquisa científica em locais com recurso financeiro escasso. Logo, a possibilidade de desenvolver estações meteorológicas utilizando a plataforma Arduino do modelo Uno e sensores de baixo custo pode ser um grande avanço. Ressalta-se, entretanto, a necessidade de se tomar precauções para que a leitura dos dados obtidos com esses sensores seja correta.

2. Contextualização

A montagem de um equipamento de medição necessita passar por uma análise da precisão dos sensores. Para estudos de temperatura, voltados para a formação de ilhas de calor, Muller et al. (2015) [15] sugerem não somente uma boa cobertura temporal, mas também dados precisos e representativos. Para tanto, citam como exemplo o uso de termômetros padronizados instalados em veículos automotivos, permitindo alta resolução e espaço-temporal. Pode-se também validar os dados por meio de comparação com dados de estações climáticas urbanas. Particularmente no caso do vento, os autores defendem que o *crowdsourcing* pode ser muito benéfico, já que está é uma variável que sofre alterações em curtas distâncias [15].

Sousa, Antunes e Cabral (2015) [16] também utilizaram a técnica de comparação dos dados obtidos com os de uma estação de referência foi a utilizada. Nesse caso a calibração e aferição foi realizada por meio da equação de Fonseca et al (1995) [17]. O valor do coeficiente de determinação (R^2) irá variar de zero a um, sendo que um valor igual a 1 indica concordância total entre os resultados. Os valores de y serão os valores da estação de referência [16].

$$R^2 = \frac{(\sum xy)^2}{\sum x^2 \sum y^2} \quad (1)$$

No trabalho de Ortiz (2013) [18] o sistema de monitoramento em análise foi testado em laboratório. Os resultados encontrados foram comparados aos obtidos em uma estação meteorológica comercial padrão. Para tanto, o autor utilizou o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), que também faz uso do coeficiente de determinação.

A depender da quantidade de sensores em uso, mais de uma técnica de validação pode ser utilizada. Carre e Williamson (2018) [19] criaram um instrumento para avaliação da qualidade do ambiente interno através de onze sensores. Apesar da precisão de cada um deles ser previamente definida pelo fabricante, os autores julgaram importante verificá-la após a sua instalação. Três dos sensores foram validados de forma individual, através da comparação com um equipamento de referência. Em alguns casos foram necessárias correções de erros sistemáticos. O Quadro 1 relaciona o sensor com a técnica de validação.

Quadro 1: Técnica de Validação dos Sensores

Técnicas de validação de sensores	
Sensor	Técnica de Validação
Temperatura	O instrumento de referência foi colocado perto do sensor em uma câmara climatizada. Testes foram realizados durante o aquecimento e o resfriamento.
Velocidade do Vento	Medição da tensão do sensor de referência e do sensor em teste. Os sensores foram posicionados a uma distância de 40 mm um do outro e a 1 metro de um pequeno ventilador, que a cada 5 minutos teve a sua velocidade alterada. O procedimento foi realizado para quatro orientações (norte, sul, leste e oeste). A velocidade do vento (v , em m/s) se relaciona com a tensão do sensor (V , em mV) através da equação 2: $v = 4,75 \times 10^{-33} \times V^{9,84} \quad (1)$
Nível de pressão sonora	Os testes foram conduzidos em uma sala silenciosa onde tons de áudio foram tocados em diferentes frequências e amplitudes. As respostas de ambos os sistemas foram gravadas.

Fonte: adaptado de Carre e Williamson (2018).

3. Procedimentos Metodológicos

Para o desenvolvimento das estações interna e externa foi utilizado a plataforma de desenvolvimento Arduino do modelo Uno. Esse Arduino possui uma microcontroladora

baseada no ATmega328P da Atmel, 14 pinos de entrada/saída digital, 6 entradas analógicas, um ressonador cerâmico de 16 MHz, uma conexão USB e um conector de alimentação. Além disso, funciona com alimentação de 7 a 12Vcc [10].

Além do Arduino Uno, a estação interna proposta possui um sensor de temperatura (TBS) e umidade (UR), uma leitora de cartão SD, um display LCD com teclado, um sensor de som e um relógio de tempo real, do inglês *Real Time Clock-RTC*. Estes estão conectados ao Arduino Uno conforme mostrado na Figura 1a. A Figura 1b mostra uma imagem da solução proposta. Na estação externa proposta foi utilizado um sensor de temperatura (TBS) e umidade (UR), uma leitora de cartão SD, um sensor de som, um sensor anemômetro (Vvento), um sensor GPS, um sensor termômetro de globo (TRM) e um relógio de tempo real, do inglês *Real Time Clock - RTC*. Estes dispositivos estão conectados ao Arduino Uno conforme mostrado na Figura 2a. A Figura 2b mostra uma imagem da solução proposta. Um adaptador de energia ou um conjunto de baterias de 7,4Vcc foi usado para alimentar o circuito. As especificações de cada sensor e componente, incluindo as faixas de medição, são detalhadas no Quadro 2.

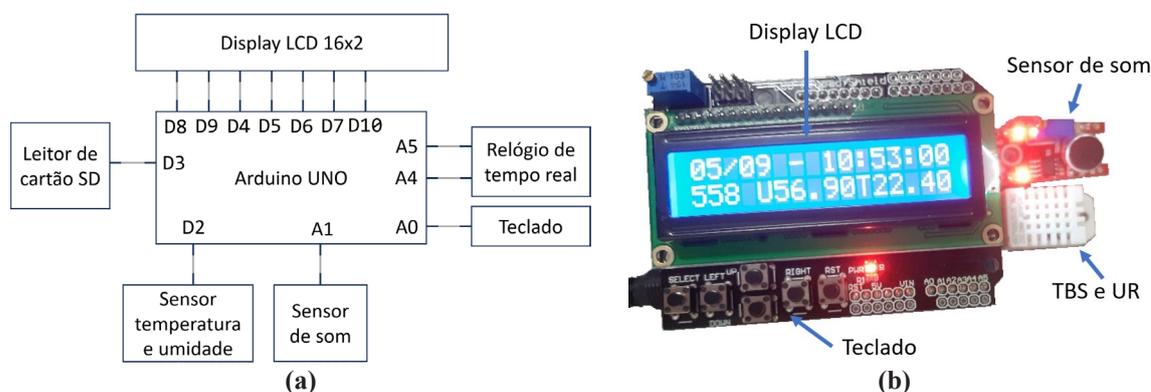


Figura 1: Estação interna proposta: a) Conexão entre os dispositivos ao Arduino Uno e b) Imagem da solução proposta. Fonte: Elaborado pelos autores.

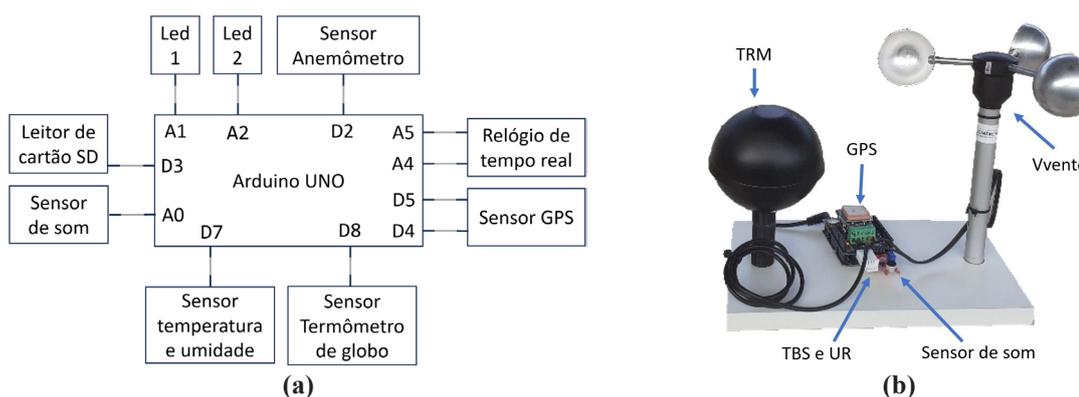


Figura 2: Estação externa proposta: a) Conexão entre os dispositivos ao Arduino Uno e b) Imagem da solução proposta. Fonte: Elaborado pelos autores.

O fluxograma de operação dos sistemas das estações interna e externa estão demonstradas nas Figuras 3a e 3b respectivamente. As estações propostas efetuam as leituras de todos os sensores conectados ao sistema, em seguida, exibe todas as informações no display LCD. O teclado da estação interna é utilizado para alternar as telas com diferentes leituras dos sensores.

Para otimizar a capacidade de armazenamento dos cartões SD, ambas as estações fazem gravações a cada 10 minutos.

Quadro 2: Características dos sensores utilizados na construção da estação de medição.

Detalhamento					
Sensor	Modelo	Tensão de Operação	Precisão	Faixa de medição	Outras informações
Temperatura e Umidade	DHT22/AM2302	3 - 5VDC	Umidade: \pm 2% Temperatura: \pm 0,5°C	Umidade: 0 a 100% Temperatura: -40° a 80°C	Corrente de operação: 2,5mA
Som	KY-038	5VDC	Sensibilidade ajustável via potenciômetro	Sensibilidade ajustável via potenciômetro	Corrente de operação: 26mA
Velocidade do vento	Anemômetro Digital Mini Standart para Arduino Nodemcu Pic	---	---	Sensibilidade iniciada em 0,9km/h	"Canecos" em alumínio c/ 50 mm diâmetro Diâmetro total de 210 mm
Termômetro de globo	Sensor De Temperatura Ds18b20, Sonda À Prova D'água	3.0V a 5.5V	\pm 0.5°C	-10 a +85°C	Gama de temperatura utilizável: -55 a 125 ° C (-67 ° F a 257 ° F)
GPS	Modulo Gps Gy-neo6mv2 Arduino Raspberry Neo-6m Gy Neo6mv2	3.0V a 5V	---	---	Taxa de transmissão padrão: 9600bps
Display LCD	Display LCD 16X2 Shield com Teclado	5VDC	—	—	Corrente de operação: 26mA

Fonte: Elaborado pelos autores.

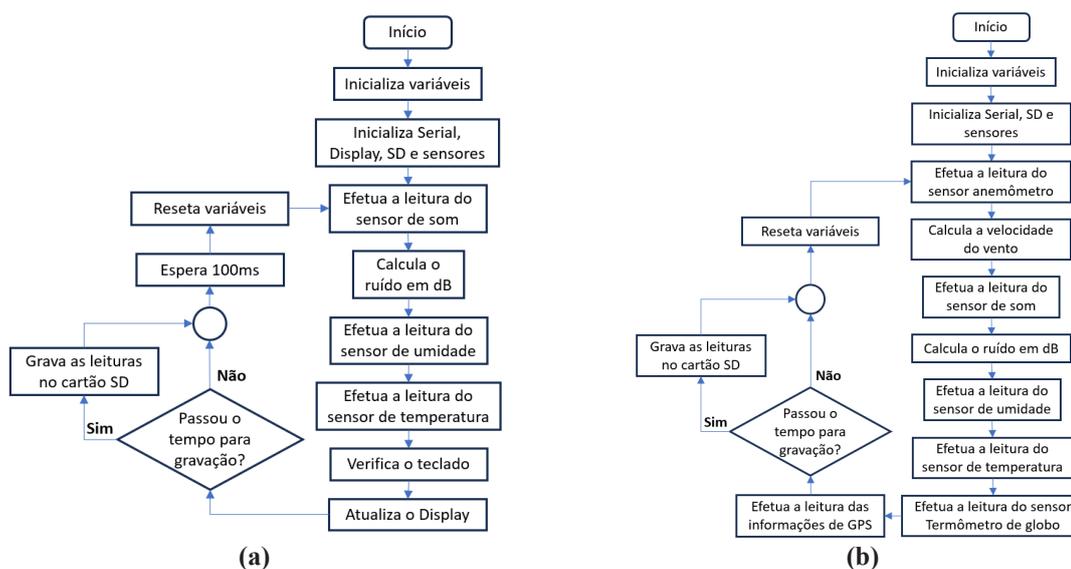


Figura 3: Fluxograma operacional do sistema da Estação proposta: a) Estação interna e b) Estação externa.
Fonte: elaborado pelos autores.

A calibração dos sensores de temperatura de bulbo seco e umidade relativa, bem como a verificação da precisão dos sensores, se deu através da comparação dos dados obtidos com dados lidos em um Termo - Higrômetro Digital com Sensor Externo, Figura 4, instalado dentro de uma câmara climatizada, Figura 5. Foram realizadas 12 medições de temperatura e umidade com um intervalo de 10 minutos entre cada. A primeira medição ocorreu no dia 05 de setembro de 2022 às 10h33. O número de medições foi definido com base no tempo agendado de permanência na câmara. Os sensores foram posicionados o mais próximo possível do equipamento de medição. Um aparelho de ar-condicionado manteve a temperatura no interior da câmara em torno dos 20°C. Após a coleta dos dados, foi utilizada a equação de Fonseca et al (1995) como forma de quantificar a qualidade dos dados obtidos por meio das estações montadas com o Arduino.



Figura 4: Termo-Higrômetro Digital. Fonte: elaborado pelos autores.



Figura 5: Câmara climatizada com localização dos sensores. Fonte: elaborado pelos autores.

4. Resultados

Os resultados apresentados a seguir demonstram a relação entre a temperatura e a umidade relativa medidas através do Termo-Higrômetro Digital e dos dois equipamentos desenvolvidos com a plataforma Arduino. Na Figura 6 pode-se observar que a temperatura medida pelo Termo-Higrômetro (linha cinza) esteve sempre inferior à temperatura medida pelas estações experimentais. Contudo, a variação é aproximadamente constante. Na Figura 7, que apresenta a dados de umidade relativa do ar, vemos uma diferença maior entre os valores medidos pelo Termo-Higrômetro e pelas estações experimentais propostas. Neste caso, porém, a estação interna apresentou valores inferiores aos medidos pelo Termo-Higrômetro, enquanto que a estação externa apresentou valores superiores. Novamente as linhas tendem a se posicionar de forma paralela. Contudo, isto só passa a ocorrer a partir da quarta medição, o que leva a indicar que o sensor necessitou de um período maior para adaptação.

Visto que, apesar dos valores divergentes, parece haver uma variação aproximadamente constante entre os dados medidos pelo Termo-Higrômetro e pelas estações experimentais propostas, iniciou-se o processo de calibração. Para tanto, foi calculada a média das diferenças de cada uma das medições, obtendo-se assim um coeficiente de correção. Em seguida, para cada medição das estações internas e externas foram aplicados os coeficientes calculados, que são apresentados na Tabela 1. Os resultados encontrados após este procedimento são mostrados na Figuras 8 e na Figura 9. Observa-se que o procedimento de calibração aproximou de forma

significativa as curvas de medição. O único momento em que isso não ocorre é nas três primeiras medições da umidade relativa, reforçando a necessidade de aguardar 30 min para iniciar a leitura dos resultados.

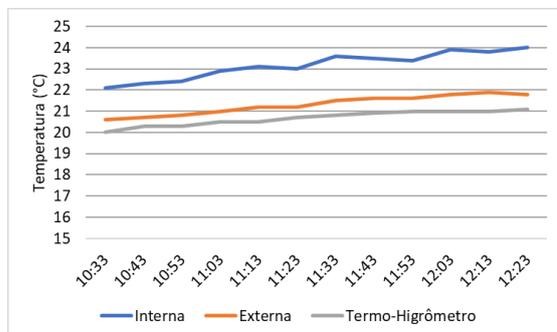


Figura 6: Temperatura no interior da câmara climatizada. Fonte: Elaborado pelos autores.

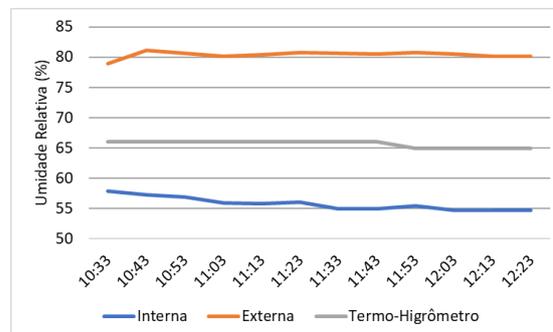


Figura 7: Umidade relativa no interior da câmara climatizada. Fonte: Elaborado pelos autores.

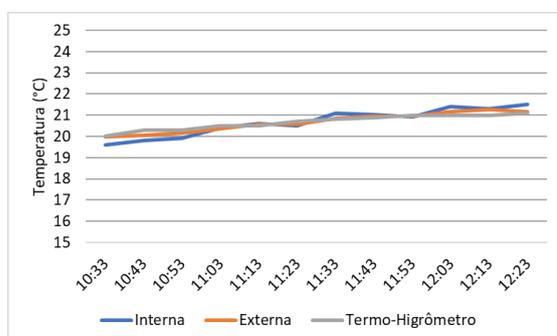


Figura 8: Temperatura no interior da câmara climatizada – corrigida com base no coeficiente de correção. Fonte: Elaborado pelos autores.

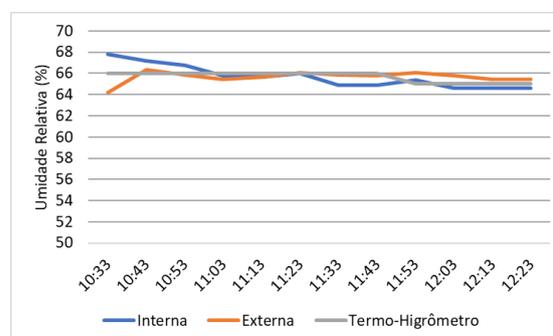


Figura 9: Umidade relativa no interior da câmara climatizada – corrigida com base no coeficiente de correção. Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 1: Coeficientes de Correção.

	Temperatura (°C)	Umidade Relativa (%)
Estação interna	-2,37	+9,35
Estação externa	-0,61	-14,6

Fonte: Elaborado pelos autores.

A fim de quantificar a calibração dos sensores estudados, foi adotado o cálculo do coeficiente de determinação (R^2), apresentado por e Fonseca et al (1995) e definido pela equação 1. Para a temperatura, o valor de R^2 foi de 0,9997 para a estação interna, e de 0,9999 para a estação externa. Para a umidade, o valor de R^2 foi de 0,9998 para ambas as estações. Ressalta-se, portanto, que em todas as medições o valor de R^2 está muito próximo de 1, o que indica que as estações experimentais apresentam resultados confiáveis, podendo ser usados em pesquisas científicas. Para verificar se o ajuste feito nos sensores com base nos coeficientes de correção - definidos pela média da diferença entre os dados medidos pelos sensores e pelo Termo-Higrômetro - gera resultados coerentes, novas medições foram realizadas na mesma câmara climatizada. Ressalta-se que nesta segunda medição os coeficientes de correção apresentados na Tabela 3 já haviam sido incluídos no cálculo das leituras medidas dos sensores. Os resultados encontrados são apresentados na Figura 10 e na Figura 11. Com base nesses resultados, observa-se que os dados gerados pela estação externa (linha laranja no gráfico) estão

muito próximos daqueles apresentados no Termo-Higromêtro (linha cinza), tendo sido encontrado um coeficiente R^2 igual a 0,999. Para a estação interna (linha azul), contudo, apesar do coeficiente R^2 também ser igual a 0,999, pode-se perceber que ainda há uma diferença mais significativa, embora esta diferença seja aproximadamente constante.

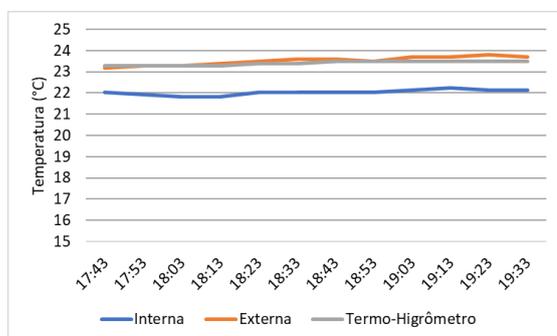


Figura 10: Temperatura no interior da câmara climatizada – 2ª medição. Fonte: Elaborado pelos autores.

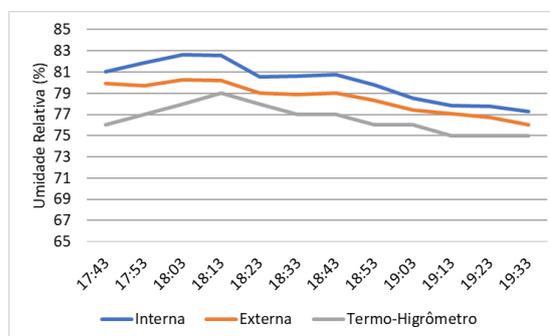


Figura 11: Umidade relativa no interior da câmara climatizada – 2ª medição. Fonte: Elaborado pelos autores.

A análise dos gráficos e do valor do coeficiente R^2 encontrado leva a crer que o sensor de temperatura e umidade da estação externa apresenta boa confiabilidade para a medição da temperatura do ar. Os valores encontrados para a umidade relativa também parecem coerentes. Contudo, se na primeira medição os dados encontrados nos primeiros 30 minutos estavam mais divergentes, nesta segunda medição, os valores se aproximam de forma mais significativa apenas 1 hora após o início das medições. Para o sensor de temperatura e umidade da estação interna, contudo, recomenda-se nova rodada de testes, com maior tempo de medição, já que com a elevação da temperatura do ar no interior da câmara ocorreu um aumento da diferença entre os valores encontrados, tanto para umidade, quanto para a temperatura.

5. Considerações Finais

Ao longo deste presente trabalho foi observado que os dois sensores testados apresentaram divergências significativas entre eles, diferença essa que pode ser ajustada com base na comparação com um equipamento já calibrado. A metodologia proposta permitiu a validação do sensor utilizado na estação externa, possibilitando assim atingir o objetivo desta pesquisa, que foi o desenvolvimento e calibração de um equipamento de baixo custo para medição de dados climáticos (temperatura e umidade). Entretanto, o período de teste não foi suficiente para a calibração do sensor da estação interna.

Destaca-se assim a limitação deste trabalho, que se encontra no tempo de calibração. Como a metodologia exige que o pesquisador esteja dentro da câmara durante todo o período de medição, períodos mais longos acabam não sendo viáveis. Como trabalho futuro, recomenda-se o teste dos sensores com base na comparação com um equipamento capazes de armazenar dados. Assim, um período maior de medição poderia ser obtido.

Para os trabalhos futuros a presente pesquisa inclui a proposta de instalação de um módulo de comunicação sem fio para transmissão para um servidor em nuvem para acesso dos dados medidos em tempo real, tornando estas estações meteorológicas de baixo custo parte da Internet das Coisas, do inglês *Internet Of Things-IoT*. Além disso, o uso de um sistema fotovoltaico para a estação externa também é parte de um trabalho futuro.

Referências

- [1] SINGH, Dushyant Kumar; JERATH, Himani. Low Cost Iot Enable Weather Station for Precision Agriculture. International Journal Of Recent Technology And Engineering (Ijrte), [S.L.], v. 8, n. 4, p. 3183-3186, 30 nov. 2019. Blue Eyes Intelligence Engineering and Sciences Engineering and Sciences Publication - BEIESP. <http://dx.doi.org/10.35940/ijrte.d8021.118419>.
- [2] LOG, Torgrim. Indoor relative humidity as a fire risk indicator. Building And Environment, [S.L.], v. 111, p. 238-248, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.002>.
- [3] BERNARDES, Gabriel F.L.R.; ISHIBASHI, Rogério; IVO, André A.s.; ROSSET, Valério; KIMURA, Bruno Y.L.. Prototyping low-cost automatic weather stations for natural disaster monitoring. Digital Communications And Networks, [S.L.], Journal Pre-proof, p. 1-20, maio 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dcan.2022.05.002>.
- [4] SUN, Chen-Yi; KATO, Soushi; GOU, Zhonghua. Application of Low-Cost Sensors for Urban Heat Island Assessment: a case study in taiwan. Sustainability, [S.L.], v. 11, n. 10, p. 2759, 14 maio 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su11102759>.
- [5] LI, Jiayu; ZHANG, Huang; CHAO, Chun-Ying; CHIEN, Chih-Hsiang; WU, Chang-Yu; LUO, Cyuan Heng; CHEN, Ling-Jyh; BISWAS, Pratim. Integrating low-cost air quality sensor networks with fixed and satellite monitoring systems to study ground-level PM2.5. Atmospheric Environment, [S.L.], v. 223, p. 117293, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117293>.
- [6] IKRAM, Jahangir; TAHIR, Amer; KAZMI, Hasanat; KHAN, Zonia; JAVED, Rabi; MASOOD, Usama. View: implementing low cost air quality monitoring solution for urban areas. Environmental Systems Research, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 1-8, 5 out. 2012. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1186/2193-2697-1-10>.
- [7] SALGADO, Jose; MONTEIRO, Vitor; PINTO, J.; AFONSO, Joao; AFONSO, Jose. Design and Experimental Validation of a Compact Low-Cost Weather Station for Solar Photovoltaic Applications. Eai Endorsed Transactions On Energy Web, [S.L.], v. 8, n. 34, p. 167290, 23 jul. 2021. European Alliance for Innovation n.o. <http://dx.doi.org/10.4108/eai.2-12-2020.167290>.
- [8] HUERTO-CARDENAS, H.e.; LEONFORTE, F.; ASTE, N.; PERO, C. del; EVOLA, G.; COSTANZO, V.; LUCCHI, E.. Validation of dynamic hygrothermal simulation models for historical buildings: state of the art, research challenges and recommendations. Building And Environment, [S.L.], v. 180, p. 107081, ago. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107081>.
- [9] LENGFELD, Katharina; ZACHARIAS, Stefan; AMENT, Felix; AMENT, Felix. Using a Small Scale Wireless Sensor Network for Model Validation: two case studies. Meteorologische Zeitschrift, [S.L.], v. 22, n. 3, p. 283-295, 1 jul. 2013. Schweizerbart. <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0422>
- [10] ARDUINO. Disponível em: <https://www.arduino.cc/>. Acesso em 08 de ago. de 2022.
- [11] FARHAT, M.; ABDUL-NIBY, M.; ABDULLAH, M.; NAZZAL, A.. A Low Cost Automated Weather Station for Real Time Local Measurements. Engineering, Technology & Applied Science Research, [S.L.], v. 7, n. 3, p. 1615-1618, 12 jun. 2017. Engineering, Technology & Applied Science Research. <http://dx.doi.org/10.48084/etasr.118>

- [12] STRIGARO, Daniele; CANNATA, Massimiliano; ANTONOVIC, Milan. Boosting a Weather Monitoring System in Low Income Economies Using Open and Non-Conventional Systems: data quality analysis. *Sensors*, [S.L.], v. 19, n. 5, p. 1185, 8 mar. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s19051185>.
- [13] CARNEIRO, Édipo Alexandre Pereira. Desenvolvimento de um datalogger configurável e de baixo custo para aplicação em pesquisas ambientais. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação). Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2022. 238p.
- [14] MARQUES FILHO, Aldir Carpes; RODRIGUES, Jean Paulo; PONTE, Gabriel Buligonal. PLATAFORMA ARDUINO APLICADA NO DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE COLETA DE DADOS MICRO-AMBIENTAIS EM CASAS DE VEGETAÇÃO. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, [S.L.], v. 15, n. 2, p. 190-206, 31 ago. 2021. Universidade Estadual Paulista - Campus de Tupa. <http://dx.doi.org/10.18011/bioeng2021v15n2p190-206>.
- [15] MULLER, C.L.; CHAPMAN, L.; JOHNSTON, S.; KIDD, C.; ILLINGWORTH, S.; FOODY, G.; OVEREEM, A.; LEIGH, R.R.. Crowdsourcing for climate and atmospheric sciences: current status and future potential. *International Journal Of Climatology*, [S.L.], v. 35, n. 11, p. 3185-3203, 5 jan. 2015. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.4210>.
- [16] SOUSA, Romário Rosa; ANTUNES, Jaime Pereira; CABRAL, Izaias. Estação Meteorológica Experimental de Baixo Custo. *Geo Uerj*, [S.L.], n. 27, p. 80-97, 20 dez. 2015. Universidade de Estado do Rio de Janeiro. <http://dx.doi.org/10.12957/geouerj.2015.12335>
- [17] FONSECA, J. S.; MARTINS, G. A.; TOLEDO, G. L. *Estatística Aplicada*. São Paulo: Atlas. 1995. 267p.
- [18] ORTIZ, Maurício Soares. Plataforma baseada em sensores sem fio para o monitoramento de parâmetros meteorológicos. 2013. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Programa de Mestrado em Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <https://tede2.pucrs.br/tede2/handle/tede/3058>. Acesso em: 19 ago. 2022.
- [19] CARRE, Andrew; WILLIAMSON, Terence. Design and validation of a low cost indoor environment quality data logger. *Energy And Buildings*, [S.L.], v. 158, p. 1751-1761, jan. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.11.051>.

Avaliação de concretos produzidos com variadas areias de mineração – Em busca de dosagens de alto desempenho e sustentáveis

Evaluation of concretes produced with different ore sands – In search of high-performance and sustainable dosages

Cheila Barbosa de Souza, Engenheira Civil.

cheila.barbosa@hotmail.com

Mariana Menezes, Mestre em Engenharia Civil.

mariana.menezes@agera.co

Resumo

A areia proveniente do beneficiamento do minério de ferro vem sendo amplamente utilizada na construção civil do Brasil, em especial nos estados de Minas Gerais, Espírito Santo e São Paulo. Ela é utilizada como agregado miúdo na produção de argamassas, artefatos cimentícios e concreto. Com a possibilidade de produção de novas areias em diversas minas de minério de ferro no estado de Minas Gerais, o presente estudo teve o objetivo de desenvolver e analisar dosagens de concreto com variadas areias de mineração e as areias presentes no mercado industrial da região de Belo Horizonte. Foi avaliada a substituição da areia natural de rio pela areia de mineração nas dosagens de concreto e feita a análise das curvas de Abrams para as variadas dosagens desenvolvidas. Foi possível observar ganho de desempenho nas dosagens executadas com as areias de mineração com redução de até 7% do consumo de cimento nos traços. Assim, pode-se concluir que o uso das areias de mineração na produção de concreto mostra-se eficiente, com ganhos técnicos e produtivos, impulsionando uma construção sustentável, com redução de CO₂ e promoção da economia circular na cadeia construtiva.

Palavras-chave: Areia de mineração; Dosagem de concreto; Sustentabilidade; Economia circular.

Abstract

The sand from the processing of iron ore has been widely used in civil construction in Brazil, especially in the states of Minas Gerais, Espírito Santo and São Paulo. It is used as fine aggregate in the production of mortars, cement products and concrete. With the possibility of producing new sand in several iron ore mines in the state of Minas Gerais, the present study aimed to develop and analyze concrete dosages with various ore sands and sands present in the industrial market in the Belo Horizonte region. The replacement of natural river sand with mining sand in concrete dosages was evaluated and the Abrams curves were analyzed for the various dosages developed. It was possible to observe a performance gain in the dosages carried out with ore sands, with a reduction of up to 7% in cement consumption in the mixes. Thus, it can be concluded that the use of mining sand in the production of concrete is efficient, with technical and productive gains, promoting sustainable construction, reducing CO₂ and promoting the circular economy in the construction chain.

Keywords: Ore sand; Concrete dosage; Sustainability; Circular economy.

1. Introdução

O uso de agregados na construção civil, incluindo areia, triplicou nas últimas duas décadas, com um consumo aproximado de 50 bilhões de toneladas por ano e com um indicativo ainda mais crescente acompanhando o crescimento das grandes cidades e da população (UNEP, 2019). A UNEP recomenda que a areia seja reconhecida como um recurso estratégico devido à alta demanda pelo produto no desenvolvimento da construção civil.

Com o consumo em alta, há indicações de que esse recurso pode virar um problema crítico para a sustentabilidade com extração superior à capacidade natural de abastecimento, além de problemas com erosões dos leitos dos rios e alteração da biodiversidade local. Considerado como um ponto de preocupação mundial, cresce a demanda pela sustentabilidade na extração e consumo de areia, ao ponto que a 4ª Assembleia Ambiental das Nações Unidas solicitou a identificação e conhecimento de ações para sustentabilidade na cadeia produtiva de recursos minerais. Resoluções com essa finalidade visam incentivar todos os envolvidos na busca pelo desenvolvimento sustentável e melhores práticas, além da conscientização sobre os impactos e riscos oriundos da extração não regulamentada (GOLEV, Artem et al. 2022).

Nesse cenário, o beneficiamento do minério de ferro que consiste na moagem e concentração, principalmente por flotação ou separação magnética, gera um rejeito arenoso. Segundo dados da FEAM (2020), o estado de Minas Gerais gera cerca de 290 milhões de toneladas de rejeitos e materiais estéreis na atividade de mineração.

A areia da mineração oriunda do processo de beneficiamento do minério de ferro é considerada um coproduto e possui em sua composição aproximadamente 88% de sílica e 12 % de hematita. Em um passado recente, esse material era depositado em pilhas e barragens de rejeitos, sendo considerado um passivo ambiental. A areia de mineração é considerada fina em relação aos agregados utilizados em concreto e com grãos de formato esféricos.

Pesquisas recentes apontam a viabilidade técnica e ganhos de desempenho com o uso da areia de mineração na produção de pré-moldados e concretos. A morfologia da areia proporciona melhoria no empacotamento das partículas e otimização das dosagens de concreto. É o que apresentam Faria e Menezes (2022), Bento et al. (2023) Moura et al. (2020).

Desde meados de 2021, a areia de mineração vem sendo comercializada em Minas Gerais, especialmente na região metropolitana de Belo Horizonte. Seu uso tem se mostrado efetivo na produção de concreto, argamassa, artefatos, pré-moldados entre outros. Assim, com trabalhos comprovando a eficácia do material, há novos estudos em diversas minas de minério para a produção, beneficiamento e comercialização de diversificadas areias.

Diante do exposto, o objetivo do trabalho foi desenvolver dosagens de concreto para a produção industrial, utilizando variadas areias de mineração em substituição aos agregados normalmente utilizadas na região de Belo Horizonte e avaliar o desempenho técnico destes concretos.

2. Procedimentos Metodológicos

1.1. Materiais

Os materiais que normalmente são utilizados na produção de concreto usinado foram coletados diretamente com os fornecedores e as areias de mineração foram recolhidas nas minas onde ocorre a produção das mesmas. Após coleta, os materiais foram enviados para laboratório onde foi feita a caracterização dos agregados com os ensaios de massa específica, absorção de

água, granulometria e material pulverulento. As dosagens de concreto foram executadas com cimento Portland CP-V ARI RS (aglomerante), areia (agregado miúdo), brita (agregado graúdo) e aditivo plastificante polifuncional (aditivo redutor de água tipo 1 – RA1 – NBR 11768) (ABNT 2019). A Figura 1 ilustra todos os agregados que foram usados no teste e a Tabela 1 apresenta as características físicas e composição granulométrica dos agregados. Os ensaios foram executados conforme normas NBR 17054, NBR 16973 e NBR 16916 (ABNT 2022, ABNT 2021).



Figura 1: Agregados usados no estudo. Fonte: elaborado pelos autores.

Tabela 1: Análise granulométrica dos agregados.

Peneiras (mm)	Porcentagem retida e acumulada (%)									
	A1BR	Jigue	Monjolos	V. Cobras	Liheng	Cauê	Natural de rio	Artificial gnaisse	Brita 0	Brita 1
25										
19										11,0
12,5										80,0
9,5									26,0	97,0
6,3		13,0							76,0	100,0
4,8		27,0							90,0	100,0
2,4		50,0						14,0	98,0	100,0
1,2	1,0	67,0		1,0		1,0	3,0	37,0	99,0	100,0
0,6	4,0	76,0	11,0	8,0	1,0	2,0	34,0	54,0	100,0	100,0
0,3	11,0	80,0	34,0	32,0	9,0	3,0	84,0	65,0	100,0	100,0
0,15	40,0	89,0	73,0	70,0	56,0	22,0	96,0	77,0	100,0	100,0
Fundo	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Dimensão máxima característica (mm)	0,6	9,5	0,6	1,2	0,6	0,6	1,2	4,8	12,5	25,0
Módulo de finura (%)	0,56	3,89	1,18	1,11	0,63	0,28	2,17	2,47	6,10	7,08
Pulverulento (%)	21	6,0	13,60	13,20	6,80	13,80	1,0	13,20	1,0	0,20
Massa específica (%)	2,78	3,09	3,09	3,13	2,89	2,86	2,63	2,66	2,66	2,68

Fonte: Autores.

1.2. Métodos

Inicialmente foram definidas as mesclas e composições dos agregados graúdos e miúdos que seriam utilizados nas dosagens dos concretos. Para o cálculo das dosagens foi feita a análise dos ensaios de todos os materiais estudados e definidas as mesclas de materiais, teor de argamassa de cada traço e a demanda de água. Após essa análise foram rodados em laboratório alguns traços iniciais para análise visual do estado fresco dos concretos e possíveis ajustes para melhoria de desempenho e aplicação.

Por fim, com os devidos ajustes foi possível determinar a demanda de água e argamassa de cada concreto a ser executado. Como premissa, foi definido o slump 14 cm para todos os traços e um lançamento bombeável, ou seja, para tal aplicação e abatimento, o traço tem um teor de argamassa mais alto, deve ser coeso, não apresentar desagregação/segregação e de boa trabalhabilidade. Para os traços com presença da areia de jigue foi utilizada somente a brita 1, visto que o Jigue tem em sua composição granulométrica 27% de material retido na peneira 4,8 mm (pedrisco). Para os demais traços foi utilizada a proporção de 85% de brita 1 e 15% de brita 0. A dosagem do aditivo polifuncional foi de 0,85% sobre o peso do aglomerante.

Com todos os parâmetros definidos, foram executadas as curvas de Abrams para verificar a resistência e desempenho de cada dosagem. Na execução das curvas foram rodados 4 traços para as variadas mesclas de areias com a/c's (relação água/cimento) diferentes: 0,450 / 0,600 / 0,750 e 0,900. Com os a/c's espaçados (baixo, intermediário e alto) foi possível construir as curvas de Abrams de forma mais precisa. Para todos os a/c's foram moldados corpos de prova para ensaio de resistência à compressão nas idades de 3, 7 e 28 dias conforme NBR 5738 (ABNT 2015).

Com todas as curvas finalizadas e os resultados disponíveis, foi possível desenhar as curvas de Abrams e fazer a análise de todo o estudo para verificar quais curvas tiveram melhor desempenho no quesito resistência, demanda de água e consumo de cimento para as variadas resistências que normalmente são utilizadas na construção civil. As dosagens executadas estão apresentadas nas Tabelas 2 a 8.

Tabela 2: Dosagem 60% Jigue + 40% A1BR.

Mescla	A/C	CP-V	Água	Aditivo	Jigue	A1BR	Brita 1
		kg/m ³					
60% Jigue + 40% A1BR	0,483	448,0	217,0	3,811	527,0	352,0	922,0
	0,595	342,0	204,0	2,906	601,0	400,0	937,0
	0,732	274,0	201,0	2,333	641,0	428,0	941,0
	0,893	228,0	203,0	1,937	665,0	443,0	938,0

Fonte: Autores.

Tabela 3: Dosagem 60% Jigue + 40% Monjolos.

Mescla	A/C	CP-V	Água	Aditivo	Jigue	Monjolos	Brita 1
		kg/m ³					
60% Jigue + 40% Monjolos	0,468	441,0	206,0	3,748	597,0	398,0	892,0
	0,600	333,0	200,0	2,833	668,0	445,0	899,0
	0,776	265,0	205,0	2,251	702,0	468,0	893,0
	0,972	219,0	213,0	1,859	722,0	481,0	885,0

Fonte: Autores.

Tabela 4: Dosagem 60% Gnaisse + 40% Vale das Cobras.

Mescla	A/C	CP-V	Água	Aditivo	Gnaisse	V. Cobras	Brita 0	Brita 1
		kg/m ³						
60% Gnaisse + 40% Vale das Cobras	0,476	452,0	215,0	3,839	503,0	336,0	138,0	781,0
	0,624	340,0	212,0	2,889	566,0	378,0	138,0	784,0
	0,774	272,0	211,0	2,315	604,0	403,0	139,0	785,0
	0,967	225,0	218,0	1,912	623,0	415,0	137,0	778,0

Fonte: Autores.

Tabela 5: Dosagem 60% Gnaisse + 40% Liheng.

Mescla	A/C	CP-V	Água	Aditivo	Gnaisse	Liheng	Brita 0	Brita 1
		kg/m ³						
60% Gnaisse + 40% Liheng	0,471	453,0	214,0	3,852	490,0	326,0	138,0	782,0
	0,630	340,0	214,0	2,887	549,0	366,0	138,0	782,0
	0,827	269,0	222,0	2,285	578,0	385,0	137,0	774,0
	0,947	226,0	214,0	1,924	608,0	405,0	138,0	782,0

Fonte: Autores.

Tabela 6: Dosagem 60% Gnaisse + 40% Natural de rio.

Mescla	A/C	CP-V	Água	Aditivo	Gnaisse	Natural de rio	Brita 0	Brita 1
		kg/m ³						
60% Gnaisse + 40% Natural de rio	0,450	458,0	206,0	3,891	477,0	318,0	139,0	790,0
	0,612	342,0	209,0	2,907	533,0	355,0	139,0	787,0
	0,765	274,0	209,0	2,325	567,0	378,0	139,0	787,0
	0,900	229,0	206,0	1,946	593,0	395,0	139,0	790,0

Fonte: Autores.

Tabela 7: Dosagem 60% Gnaisse + 40% Cauê.

Mescla	A/C	CP-V	Água	Aditivo	Gnaisse	Cauê	Brita 0	Brita 1
		kg/m ³						
60% Gnaisse + 40% Cauê	0,472	453,0	214,0	3,851	448,0	299,0	147,0	835,0
	0,654	337,0	220,0	2,864	503,0	336,0	146,0	829,0
	0,781	272,0	213,0	2,314	544,0	363,0	148,0	837,0
	0,967	225,0	218,0	1,915	564,0	376,0	147,0	831,0

Fonte: Autores.

Tabela 8: Dosagem 60% Gnaisse + 40% A1BR.

Mescla	A/C	CP-V	Água	Aditivo	Gnaisse	A1BR	Brita 0	Brita 1
		kg/m ³						
60% Gnaisse + 40% A1BR	0,480	452,0	217,0	3,839	467,0	311,0	141,0	797,0
	0,612	342,0	209,0	2,906	530,0	354,0	142,0	805,0
	0,738	276,0	203,0	2,342	570,0	380,0	143,0	811,0
	0,888	229,0	204,0	1,951	593,0	395,0	143,0	810,0

Fonte: Autores.

3. Apresentação e Análise dos Resultados

Inicialmente, foi feita a análise granulométrica de todas as mesclas de areias e das britas que foram executadas nas dosagens dos concretos. As mesclas de areias onde há a presença do jigue e da areia natural ficaram com uma granulometria mais grossa quando comparadas às demais mesclas. As Figuras 2 e 3 indicam os limites e as zonas utilizáveis de granulometrias, dispostas na norma NBR 7211 (ABNT 2022) comparados com todos os agregados usados nesse estudo. Algumas mesclas de areias ficaram fora desses limites e as britas mescladas ficaram próximas do limite superior estabelecido para a zona granulométrica 9,5/25 mm. Mas, conforme ressalta a norma em questão, os agregados com distribuição granulométrica diferentes dos limites estabelecidos podem ser usados desde que estudos prévios de dosagem de concreto comprovem a aplicabilidade dos materiais.

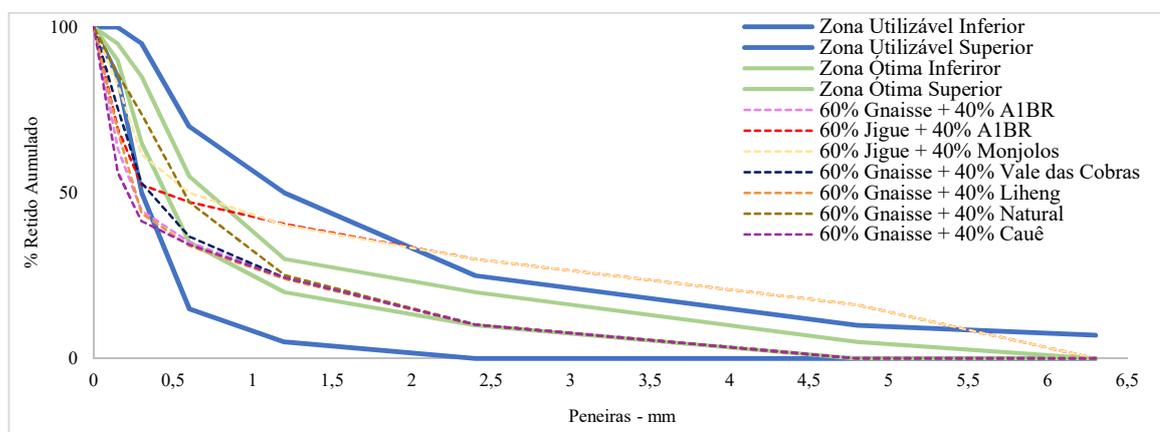


Figura 2: Granulometria de agregados miúdos comparativa com NBR 7211. Fonte: elaborado pelos autores.

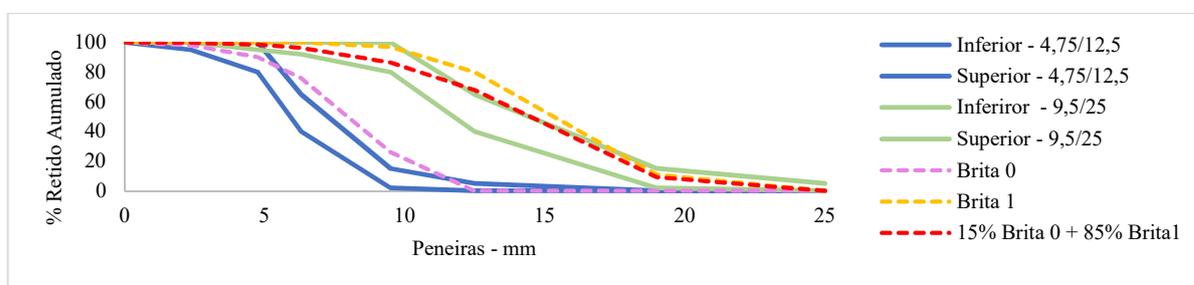


Figura 3: Granulometria de agregados graúdos comparativa com NBR 7211. Fonte: elaborado pelos autores.

A Tabela 9 mostra o comparativo de todas as curvas executadas nesse estudo para as dosagens de concreto no estado fresco. As curvas com uma demanda de água mais alta foram as de 60% Gnaisse + 40% Cauê e 60% Gnaisse + 40% Liheng. As curvas com menor demanda de água foram as curvas com a areia jigue. Conforme demonstra a Tabela 1, esse material tem uma curva granulométrica ampla, que abarca faixas granulométricas tanto de brita 0 como de areia grossa, o que contribuiu para um bom empacotamento de partículas dos agregados.

Ao analisar o teor de argamassa necessário para cada dosagem, observa-se que a curva com a areia Cauê possui um menor teor de argamassa devido à própria característica do material, que tem granulometria fina e com isso possibilita que a dosagem do concreto tenha uma argamassa mais baixa de forma que sua reologia fique adequada. Já a curva com 60% Jigue + 40% Monjolos foi a que demandou um teor de argamassa mais alto, pois como a granulometria dos agregados miúdos é mais grossa, para uma dosagem adequada e com reologia apropriada, o concreto demanda uma argamassa alta.

Tabela 9: Curvas de Abrams - comparativo do estado fresco das dosagens.

Curvas de Abrams	Média de demanda de água (litros)	Ar incorporado (%)	Teor de argamassa (%)	Slump final (cm)
60% Jigue + 40% A1BR	206,3	1,6	56,0	14,0
60% Jigue + 40% Monjolos	206,0	2,7	58,0	14,0
60% Gnaisse + 40% Vale das Cobras	214,0	3,9	56,0	14,0
60% Gnaisse + 40% Liheng	216,0	3,2	56,0	14,0
60% Gnaisse + 40% Natural de rio	207,5	4,4	56,0	14,0
60% Gnaisse + 40% Cauê	216,3	5,1	53,0	14,0
60% Gnaisse + 40% A1BR	208,3	3,9	55,0	14,0

Fonte: Autores.

Com os ensaios de resistência à compressão axial finalizados, as curvas de Abrams foram desenhadas a partir das resistências obtidas em cada idade e suas respectivas relações água/cimento. As curvas foram ajustadas pelo método dos mínimos quadrados com o coeficiente de determinação R^2 acima de 0,98. A Figura 4 indica as curvas desenhadas na idade 28 dias. Percebe-se que todos os concretos com os agregados da mineração tiveram desempenho superior ao concreto referência 60% gnaisse + 40% natural.

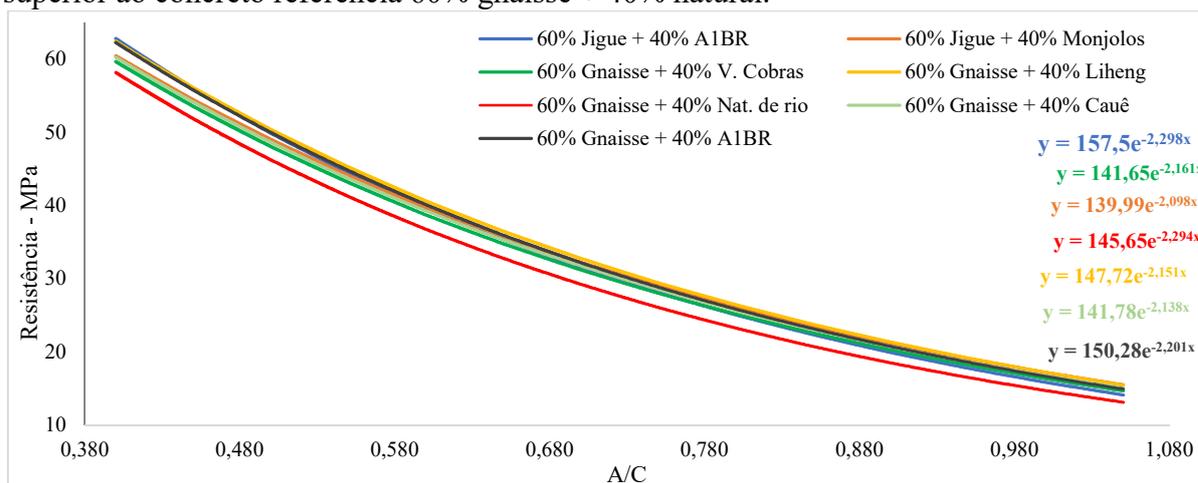


Figura 4: Curvas de Abrams - 28 dias. Fonte: elaborado pelos autores.

A Tabela 10 mostra o crescimento médio de resistência entre a idade de 7 e 28 dias de cada curva executada nesse estudo. As curvas onde há a presença dos agregados de mineração apresentaram melhores crescimentos quando comparados com a curva referência de areia gnaisse e natural, que teve o menor crescimento de resistência entre 7 e 28 dias.

Tabela 10: Crescimento de resistência à compressão.

Curvas de Abrams	Média de demanda de água (litros)
60% Jigue + 40% A1BR	41,0%
60% Jigue + 40% Monjolos	43,0%
60% Gnaisse + 40% Vale das Cobras	43,0%
60% Gnaisse + 40% Liheng	26,0%
60% Gnaisse + 40% Natural de rio	23,0%
60% Gnaisse + 40% Cauê	32,0%
60% Gnaisse + 40% A1BR	32,0%

Fonte: Autores.

A partir das curvas executadas e da demanda de água para cada mistura, foi possível estimar o consumo de cimento para algumas classes de resistência comumente utilizadas na construção civil. Foi utilizado o desvio-padrão 4 e condição de preparo do concreto A, conforme ABNT 12655 (ABNT 2022). Conforme Figura 5, as curvas que apresentaram o menor consumo de cimento para um metro cúbico de concreto produzido, considerando as várias faixas de fck calculadas foram as curvas com a areia de jigüe e a curva com 60% gnaisse + 40% A1BR. A curva com o maior consumo de cimento foi a de 60% gnaisse + 40% natural.

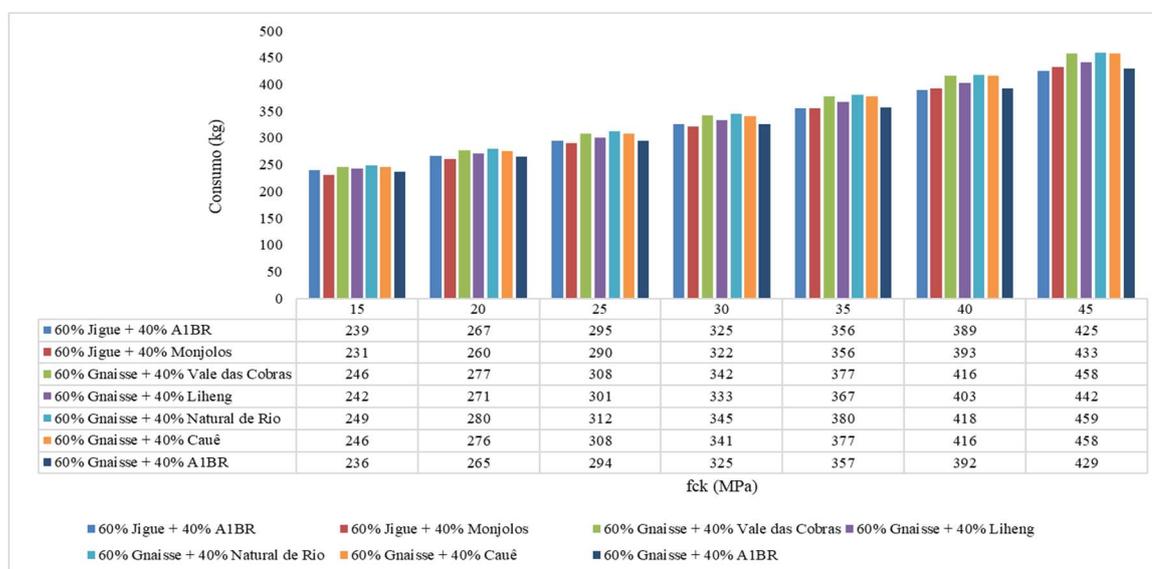


Figura 5: Consumo de cimento/m³ de concreto produzido. Fonte: elaborado pelos autores.

4. Conclusão

O presente estudo teve como objetivo avaliar o uso de diversas areias de mineração na produção de concreto para verificar possíveis ganhos de desempenho, trabalhabilidade e redução de custos. Os resultados apresentados foram positivos e com as curvas de Abrams desenvolvidas foi possível verificar que todas as mesclas executadas com areia de mineração tiveram desempenho superior quando comparadas com a referência executada com areia natural e artificial gnaisse. Há um destaque para 3 curvas que tiveram desempenhos muito parecidos e superiores às demais curvas executadas: as duas curvas com jigüe e a curva com 60% gnaisse mais 40% A1BR. Essas curvas apresentaram uma redução de até 7% do consumo de cimento, o que representa em média, 24 quilos de cimento a menos na execução dessas dosagens.

As dosagens de concreto avaliadas no estudo alcançaram até 1.203kg/m³ de agregados provenientes do beneficiamento de minério de ferro em seu traço. A produção de concretos com esse teor expressivo de materiais que de outra maneira seriam descartados se mostra como um avanço relevante para a circularidade da construção. Vale destacar que, pelo estudo, não foi encontrado nenhum limitante para o uso amplo destes materiais, em diversos tipos de concreto, sendo uma solução escalável para o setor. Para além do alto teor de substituição de agregados no traço, os agregados permitiram redução no consumo de cimento dos traços, material que está diretamente associado ao impacto em mudanças climáticas do concreto.

Sabendo-se da importância da sustentabilidade na construção civil, da busca por materiais de origem controlada, com qualidade e que não degradem o meio ambiente, o uso da areia de mineração na produção de concreto se mostra eficiente, com ganhos de desempenho técnico e produtivos, impulsionando uma construção sustentável, com redução de CO₂ e promoção da economia circular na cadeia construtiva.

Referências

- [1] UNEP. Sand and sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources: synthesis for policy makers. United Nations Environment Programme, Nairobi, 2019.
- [2] GOLEV, Artem et al. Ore-sand: A potential new solution to the mine tailings and global sand sustainability crises. The University of Queensland & University of Geneva, 2022.
- [3] Fundação estadual do meio ambiente – FEAM. Dados econômicos. Reporte Final, 2020.
- [4] FARIA, Filipe; MENEZES, Mariana. Redução no consumo de cimento do concreto através da utilização da areia de mineração. Congresso Brasileiro do Concreto, 2022, Anais do 63º Congresso Brasileiro do Concreto, Brasília, 2022.
- [5] BENTO, Luciano et al. Increasing circularity and material efficiency using ore sand in concrete -A Brazilian case study. The 16th International Congress on the Chemistry of Cement 2023, Bangkok, Thailand, 2023.
- [6] MOURA, Igor et al. Avaliação do desempenho de pavers fabricados com areia proveniente da exploração de minério de ferro. Congresso Brasileiro do Concreto, 2020, Anais do 62º Congresso Brasileiro do Concreto, Florianópolis, 2020.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11768: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro, 2019, 5 p.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17054: Agregados - Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022, 3 p.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16973: Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro, 2021, 2 p.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16916: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021, 4 p.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015, 4 p.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: Agregados para concreto – Requisitos. Rio de Janeiro, 2022. 5 p.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2022, 9 p.

**Análise do transporte de contaminantes agrícolas em corpos hídricos
através da simulação de uma plantação de milho na plataforma MOHID
Land em Varre-Sai, RJ**

*Analysis of the transport of agricultural contaminants in water bodies through
the simulation of a corn plantation on the MOHID Land platform in Varre-
Sai, RJ*

Laise Novellino Nunes de Souza, Doutoranda em Modelagem e Tecnologia para Meio Ambiente Aplicadas em Recursos Hídricos no Instituto Federal Fluminense (IFF). Mestre em Engenharia Ambiental pelo IFF, Graduada em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

lalanovellino@hotmail.com

Wagner Rambaldi Telles, Doutorado em Modelagem Computacional pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Graduado em matemática e professor da Universidade Federal Fluminense (UFF).

wr_telles@yahoo.com.br

Jader Lugon Junior, Pós-doutorado em Modelagem Computacional pelo Instituto Politécnico da UERJ. Coordenador do Doutorado Profissional em Modelagem e Tecnologia para Meio Ambiente Aplicadas em Recursos Hídricos do IFF.

jlugonjr@gmail.com.

Vicente de Paulo Santos de Oliveira. Professor Titular do Instituto Federal Fluminense e Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa.

vsantos@iff.edu.br

Resumo

Buscando o aumento da produção agrícola e, ao mesmo tempo, a preocupação com o meio ambiente, esse trabalho busca utilizar a plataforma MOHID Land acoplada ao modelo SWAT para demonstrar viabilidade de aplicação de tais softwares no estudo do transporte de contaminantes em meios hídricos. Para isso, foi desenvolvida uma simulação de uma plantação de milho no sítio Panorama, região do município de Varre-Sai, Rio de Janeiro. Concluiu-se que a plataforma MOHID Land pode ser utilizada para o estudo do transporte de contaminantes nos corpos hídricos, sendo uma ferramenta de gestão e auxílio a tomada de decisão para engenheiros e entidades públicas que buscam adotar medidas de controle da poluição ao meio ambiente.

Palavras-chave: Agricultura; milho; poluição.

Abstract

Seeking to increase agricultural production and, at the same time, concern for the environment, this work seeks to use the MOHID Land platform coupled with the SWAT model to demonstrate the feasibility of applying such software to study the transport of contaminants in water environments. To this end, a simulation of a corn plantation was developed at the Panorama site, in the municipality of Varre-Sai,

Rio de Janeiro. It was concluded that the MOHID Land platform can be used to study the transport of contaminants in water bodies, being a management tool and decision-making aid for engineers and public entities seeking to adopt measures to control pollution in the environment.

Keywords: Agriculture; corn; pollution.

1. Introdução

Atender às crescentes necessidades de produção de alimentos de uma sociedade e, ao mesmo tempo, manter ou melhorar a qualidade da água, é um desafio enfrentado em todo o mundo, em diversas bacias hidrográficas. Em muitas nações, a norma agrícola é que os agricultores ditem o que, quando, e onde plantar com base na procura do mercado e na utilização economicamente mais eficiente dos recursos da terra para cada empresa agrícola individual (Jiang, 2021) [1].

O Brasil é um dos maiores exportadores agrícola do mundo, e, também, o principal exportador mundial de soja, suco de laranja, açúcar, carnes, café, tabaco e etanol. Sendo ainda, o segundo maior exportador de milho e o terceiro de algodão. O sistema agrícola brasileiro foi orientado para a aquisição de máquinas e equipamentos, e a estimulação da utilização de insumos modernos. Houve grande investimento em pesquisa agrícola inovadora. Isso permitiu que o país pudesse atender uma ampla demanda de exportação, sem deixar de suprir o mercado interno (Luna; Klein, 2019) [2].

Com a modernização das práticas, e aumento das plantações, tem-se aumentado o uso de fertilizantes, que podem gerar poluição no solo e nos recursos hídricos. Para manter a produção e diminuir o uso de fertilizantes no solo, podem-se utilizar técnicas de simulação baseadas em softwares. Estas podem prever o comportamento dos ciclos de crescimento e colheita dos plantios, e o movimento dos recursos hídricos no solo, que carregam os insumos agrícolas. Com esse recurso, é possível criar soluções para a poluição dos recursos hídricos e o transporte de contaminantes, bem como, entender o consumo hídrico da vegetação.

A acidificação e a contaminação dos recursos hídricos por amoníaco são atualmente reconhecidas como graves problemas ambientais (Longhini et al., 2024; Mazur et al., 2016; Rodhe, 1989) [3],[4],[5]. Em particular, já foi observada concentrações de nitrato amoniacal em água de rio, em desconformidade com a classe 02, que é definida para recursos hídricos superficiais com águas doces, com salinidade igual ou inferior a 0,5‰ (por cento por mil) destinados ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional (CONAMA, 2005; Gomes; Barizon, 2014) [6],[7]. Ressalta-se que a poluição de águas superficiais e subterrâneas causadas pela agricultura é um problema mundial (Sandu et al., 2022; Zhang et al., 2017) [8],[9], mas essa poluição por amônia também é observada em águas salinas (Asih et al., 2022) [10].

Dentre os objetivos para o desenvolvimento sustentável, da Organização das Nações Unidas, o número 6, “Água potável e saneamento”, busca a disponibilização igualitária de água limpa e saneamento básico entre todas as populações do planeta. De modo a atender esse objetivo, até 2030, será necessário investimento na promoção da manutenção e restauração da qualidade da água (ONU, 2015) [11].

Segundo a ONU (2024) [12], atualmente, 2,4 bilhões de pessoas vivem em países com estresse hídrico, fato agravado pela poluição dos recursos hídricos, sendo que comunidades em todo o mundo estão buscando maneiras de gerenciar a água de forma mais sustentável e

encontrar novas fontes, em um contexto de mudanças climáticas que aumentam a incidência da seca.

2. Revisão Bibliográfica

Dentre os diversos softwares que podem ser utilizados na simulação da poluição de recursos hídricos, pode-se citar o MOHID *Modelling System*, o qual é um sistema modular integrado de última geração, composto por uma série de modelos que simulam corpos d'água superficiais, córregos e bacias hidrográficas. O desenvolvimento do código do MOHID segue uma metodologia que melhora sua robustez em relação a erros de programação. MOHID é escrito em ANSI FORTRAN 95, aproveitando todos os seus novos recursos, incluindo a capacidade de produzir código orientado a objetos, embora não seja uma linguagem orientada a objetos. Inclui recursos orientados a objetos. Isto resulta em uma série de modelos orientados a objetos para simular o ciclo da água que integra diversas escalas e processos diferentes (Chambel-Leitão et al., 2007) [13].

A plataforma MOHID tem sido desenvolvida para aplicações oceânicas e hidrológicas desde 1985. Sendo possível fazer simulações hidrodinâmicas e de transporte no oceano pelo MOHID Water e hidrológicas no continente pelo MOHID Land. A plataforma é oferecida como um código de programação aberto e livre, sendo produzida na MARETEC no Instituto Superior da Universidade de Lisboa. Atualmente, o código de programação do MOHID é vendido comercialmente pela empresa Bentley® através da interface OpenFlows® Flood®. Uma das interfaces da plataforma MOHID foi desenvolvida pela Bentley® sendo denominada OpenFlows Flood®. O sistema OpenFlows Flood® é um software comercial que consiste em uma interface que permite: (i) elaborar um modelo com facilidade usando os códigos da plataforma MOHID; (ii) rodar as simulações e; (iii) visualizar os resultados obtidos.

O modelo MOHID Land simula o desenvolvimento das culturas e o crescimento da biomassa, que pode potencialmente ser utilizada para estimar as taxas de lotação no ecossistema e prevenir a degradação do solo (Simionesei et al., 2018) [14].

Outro software comumente utilizado na simulação de cenários envolvendo poluição agrícola é o *Soil & Water Assessment Tool* (SWAT), o qual consiste em um modelo para bacias hidrográficas. Este software requer informações específicas sobre clima, propriedades do solo, topografia, vegetação e práticas de manejo da terra na bacia para simular diretamente processos físicos associados ao movimento da água, movimento de sedimentos, crescimento de culturas, ciclagem de nutrientes, entre outros. No SWAT, uma bacia é dividida em sub-bacias usando informações topográficas. As sub-bacias, por sua vez, são subdivididas em unidades de resposta hidrológica, que representam uma combinação única de uso da terra, tipo de solo e inclinação (Alemayehu et al., 2017; Neitsch et al., 2011) [15],[16].

O SWAT incorpora características de vários outros com melhorias, tais como: a) cálculos simultâneos em diversas sub-bacias para prever a produção de água da bacia; b) um componente de água subterrânea ou fluxo de retorno; c) um componente de armazenamento de reservatório para calcular o efeito de lagoas agrícolas e reservatórios na produção de água e sedimentos; d) um modelo de simulação meteorológica incorporando dados de precipitação, radiação solar e temperatura para facilitar simulações de longo prazo e fornecer condições meteorológicas representativas temporal e espacialmente; e) melhora o método de previsão dos picos de escoamento; f) o modelo de crescimento da cultura para contabilizar a variação anual no crescimento; g) um componente simples de roteamento de inundação; h) componentes de transporte de sedimentos para simular o movimento de sedimentos através de lagoas,

reservatórios, riachos e vales; i) o cálculo das perdas de transmissão; j) o componente de destino de um pesticida; h) tecnologia SCS, popularmente conhecida como *Curve Number*, opcional para estimar taxas de escoamento de pico e; c) equações de produção de sedimentos recentemente desenvolvidas. Essas modificações ampliaram a capacidade do modelo de lidar com uma ampla variedade de problemas de gestão de bacias hidrográficas (Neitsch et al., 2011) [16].

Cabe mencionar ainda que o SWAT apresenta um banco de dados de cobertura do solo e crescimento de plantas, no qual, contém informações necessárias ao para simular o plantio de uma cobertura de solo específica. Esses parâmetros no banco de dados definem o crescimento das plantas em condições ideais e quantificam o impacto de algumas tensões no desenvolvimento da cultura (Neitsch, 2012) [17]. O SWAT já foi utilizado para simular plantações em várias regiões, como Gana (Worqlul et al., 2018) [18], Etiópia (Wabela et al., 2022) [19] e Quênia (Alemayehu et al., 2017) [15].

Para fazer a integração entre o MOHID e o SWAT, o código fonte do SWAT foi parcialmente modificado, nomeadamente nas entradas e saídas do modelo, utilizando o código e a filosofia de programação do MOHID. Estas alterações mantiveram a integridade do modelo original, garantindo assim que os resultados permaneçam iguais aos da versão original do SWAT. Isso permitiu a saída dos resultados no formato MOHID, possibilitando o processamento imediato com as ferramentas de visualização e análise de dados do MOHID (Chambel-Leitão et al., 2007) [13].

Diante do exposto, a área de estudo é o Sítio Panorama, localizado no município de Varre Sai, no Noroeste do Rio de Janeiro, Brasil, foi utilizado como referência para este estudo, por se tratar de uma propriedade que apresenta muitos dados bibliográficos disponíveis em função da realização de estudos e pesquisas já desenvolvidos (Zanetti, 2007) [20]. A propriedade apresenta cultura de milho, mesmo não sendo esta sua plantação majoritária (Maciel et al., 2012) [21]. Entre as culturas disponíveis na região, o milho é o que apresenta mais estudos disponíveis no MOHID Land (Ramos et al., 2018)[22], por isso, esta cultura foi utilizada neste trabalho. Para estimar a quantidade de grãos na colheita de milho, é possível adotar a mesma proporção usada por Song et al. (2017) [23], isto é, a cada 1 unidade de biomassa, tem-se 0,8 unidades de grãos. Para efeito de cálculo, pode-se considerar que 20% da quantidade de biomassa seria considerada produtividade do plantio, a qual seria vendida para abastecimento interno de alimentos.

3. Objetivos

O objetivo deste trabalho é entender como as tecnologias de modelagem podem auxiliar engenheiros na gestão de contaminantes, a partir da análise de um modelo agrícola de plantação de milho formulado na Plataforma MOHID Land no município de Varre-Sai, Rio de Janeiro, Brasil.

4. Procedimentos Metodológicos

Inicialmente, para baixar o limite do sítio Panorama no município de Varre Sai utilizou-se o site do Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural- SICAR (< <https://www.car.gov.br/publico/imoveis/index> >), conforme Figura 1.

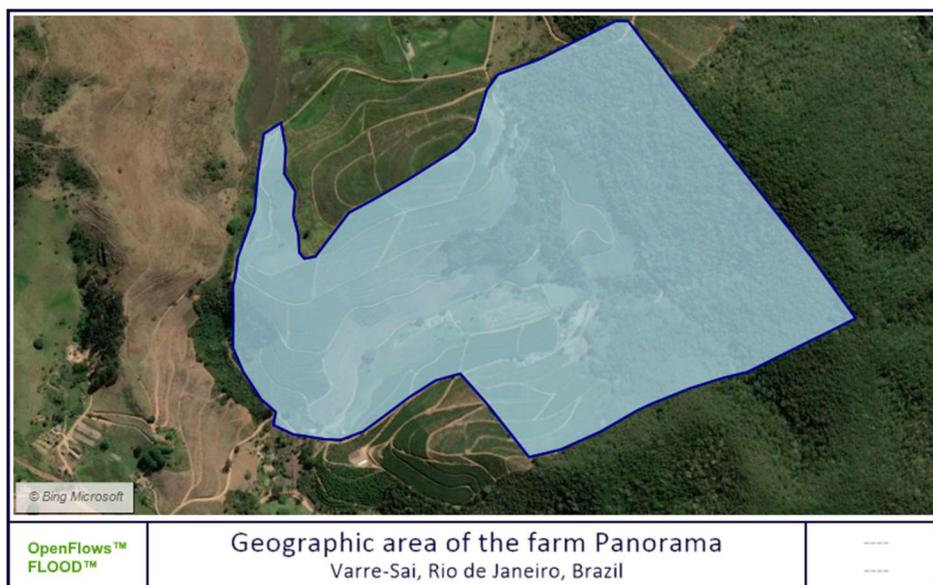


Figura 1: Área Geográfica do sítio Panorama em Varre-Sai, Rio de Janeiro, Brasil. **Fonte:** Elaborado pelos autores (2024).

Em seguida, para baixar pontos topográficos acessou-se o site TOPODATA (<<http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>>). Selecionou-se os arquivos do tipo “xyz” (longitude, latitude, elevação), os quais estão disponíveis no formato “ASCII”, em extensão “.txt”, e baixou-se o arquivo referente ao sítio de estudo, cuja localização é indicada pela numeração “20s42”. Com isso, foi possível desenvolver no MOHID, o Modelo Digital de Elevação (MDE) do terreno, em inglês *Digital Elevation Model (DEM)*, conforme Figura 2.

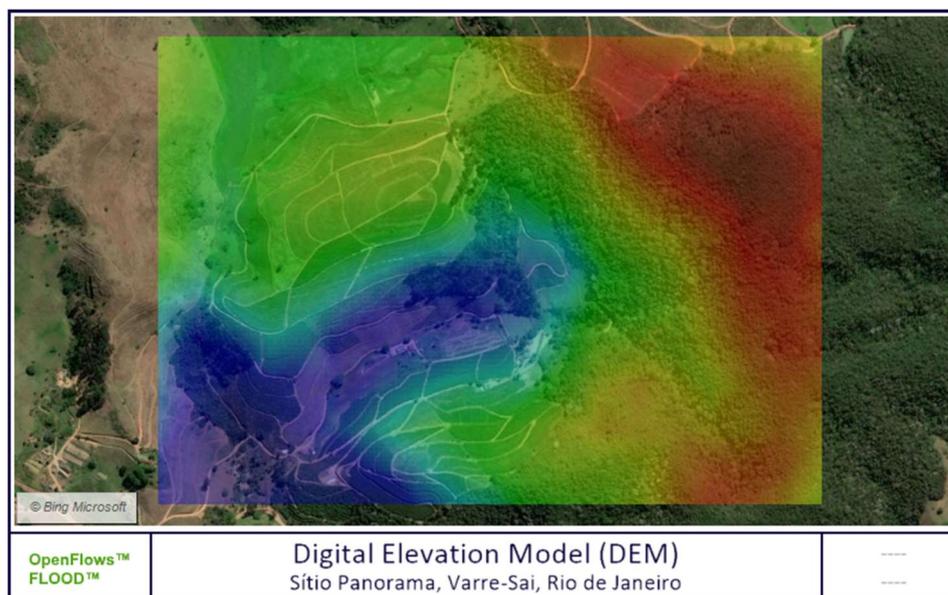


Figura 2: Modelo Digital de Elevação do sítio Panorama, Varre-Sai, Rio de Janeiro. **Fonte:** Elaborado pelos autores (2024).

Já nos dados de solo utilizados no MOHID Land para representar o sítio de Varre Sai, no Rio de Janeiro, foram adotadas 8 camadas de solo, de 12cm, 12cm, 27cm, 30cm, 33cm, 18cm, 115cm e 65cm. Os 5 (cinco) primeiros solos seguiram as porcentagens e profundidades definidos por Mendes *et al.* (2014) [24], a primeira camada tinha 57,9% de argila, 10,6% de

silte, 31,5% de argila e densidade de 1,28g/cm³, a segunda tinha 57,9% de argila, 12,9% de silte, 29,2% de argila, a terceira camada tinha 27,1% de areia, 10,9% de silte, 62% de argila e 1,22 g/cm³ de densidade, a quarta camada tinha 25,3% de areia, 10,9% de silte, 63,8% de argila, e 1,26g/cm³ de densidade, a quinta camada tinha 24,4% de areia, 9,9% de silte, e 65,7% de argila. Os valores em porcentagem da composição do solo foram utilizados para preencher a tabela do Rosetta (<https://www.handbook60.org/rosetta/>), onde foram obtidos os dados necessários para preenchimento da característica do solo no MOHID. Para preencher o coeficiente de saturação do solo (Ksat), foi necessário passar para a unidade metro por segundo (m/s) pois o Rosetta fornece o resultado na unidade centímetro por dia (cm/dia). Mendes *et al.* (2014) consideram mais três camadas de solo com características similares, entretanto, não definem suas medidas de composição em porcentagem. Nestas três últimas camadas, 6 até 8, adotou-se as mesmas características, e seu valor foi baseado no solo que já vem preenchido no modelo do MOHID Land.

Com objetivo experimental, e devido a escolha do mês de outubro, que é ensolarado, adotou-se uma radiação de 1000W/m². O tempo simulado foi de 19 (dezenove) dias, sendo que nos dias 01, 06, 10, 14 e 17 foram adotadas uma chuva de 3 milímetros (mm) a cada 15 minutos até completar 8 horas, após, ocorre um intervalo sem chuva, ao fim de 24 horas, ocorre mais 3 mm de chuva. Nos dias 02, 04, 07, 11, 15 e 18 não choveu. Nos dias 03, 08, 12, 16 e 19 adotou-se uma chuva de 3 mm no dia. O objetivo era variar as condições pluviométricas para verificar os resultados simulados.

5. Aplicações e/ou Resultados

A aplicação do resultado da simulação feita visa o estudo do transporte de contaminantes nos corpos hídricos. Isto porque ela obtém dados estimados do percurso de substâncias encontradas na agricultura, que podem ser de risco aos corpos hídricos, quando lixiviados para rios e/ou galerias subterrâneas próximas, entre eles, pode-se citar a Amônia, Figura 3, e os Coliformes termotolerantes (subgrupo das bactérias do grupo coliforme que fermentam a lactose a $44,5 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ em 24 horas), Figura 4. Sendo que a amônia é provavelmente resultado do uso de adubos nitrogenados aplicados na área enquanto os coliformes termotolerantes são originados a partir de fezes homeotérmicos também utilizada na adubação do solo.

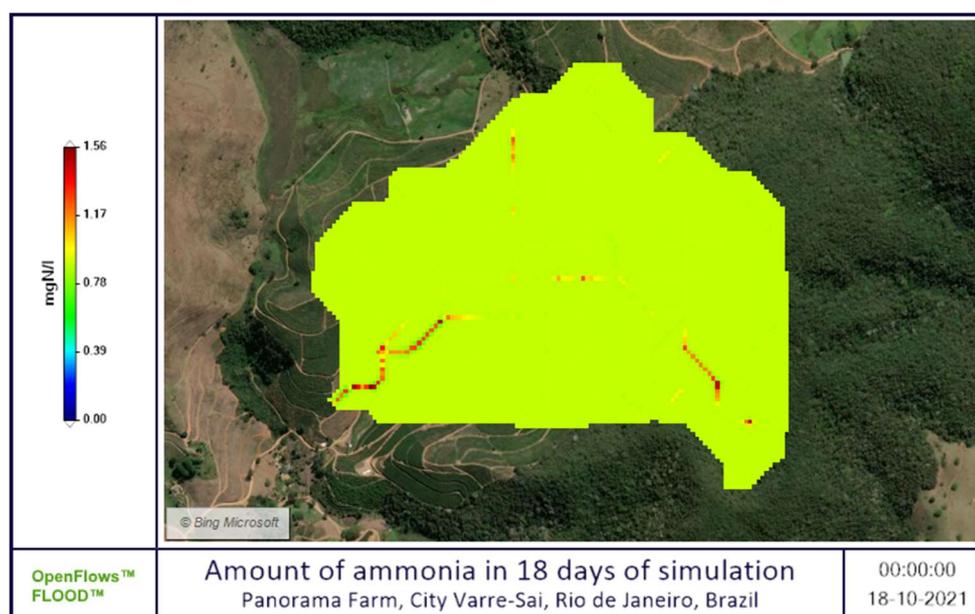


Figura 3: Fluxo de água com a medição de miligrama de Nitrogênio amoniacal por litro de água. **Fonte:** Elaborado pelos autores (2024).

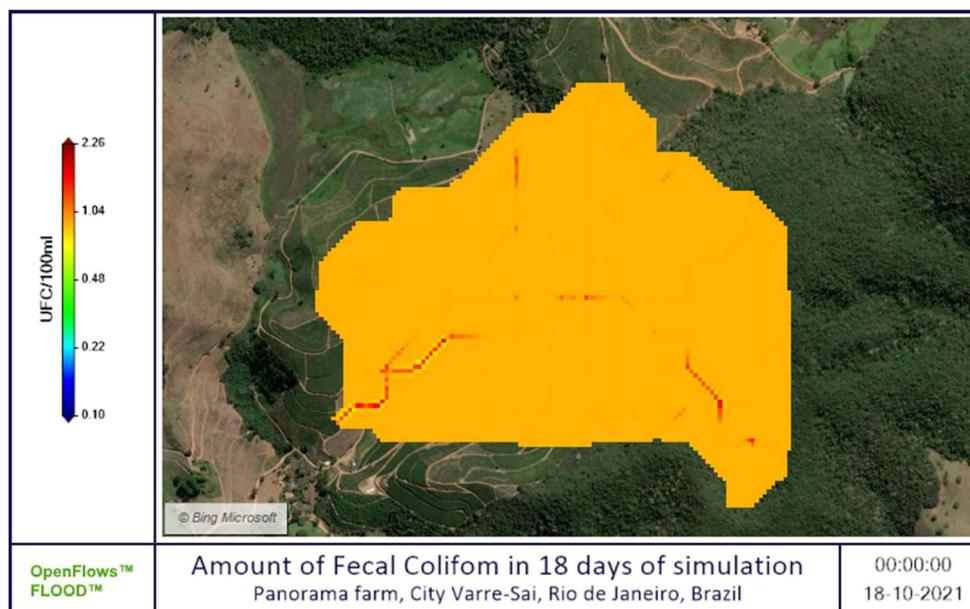


Figura 4: Fluxo de água com a medição de Unidade de Coliformes Fecais por 100ml de água. **Fonte:** Elaborado pelos autores (2024).

6. Análises dos Resultados ou Discussões

O MOHID Land tem boa sensibilidade às condições climáticas, sendo possível fazer simulações com períodos variáveis de chuva, entretanto, para a simulação de semanas e meses, devido a quantidade de dados processados, de solo, radiação, vento, chuva, fertilizantes, pesticidas, entre outros, usados como entrada, existe uma demora considerável na análise dos resultados, e/ou maior possibilidade de erros na programação. Muitos dados são encadeados, e dependentes entre si, o que faz necessário um estudo aprofundado das características da plantação, do solo da região e das características dos próprios insumos agrícolas adotados para preenchimento de lacunas no programa.

De acordo com o CONAMA (2005) [6], não deverá ser excedido um limite de 200 coliformes termotolerantes por 100 mililitros para águas de Classe 02, o que atende a unidade encontrada na Figura 3. Em complemento, na Figura 4 tem-se um valor abaixo de 3,7mg de Nitrogênio amoniacal por litro, o que é permitido para águas doces de Classe 01, com PH menor ou igual a 7,5.

7. Conclusão ou Considerações Finais

Considera-se que o objetivo do trabalho foi alcançado, pois pôde-se simular durante 19 (dezenove) dias uma plantação de milho no sítio Panorama no município de Varre Sai, no Rio de Janeiro, e com 18 (dezoito) dias, já foi possível visualizar o percurso de nitrogênio amoniacal e coliformes termotolerantes no programa. Esta visualização já permite tirar conclusões acerca da quantidade permitida pelo CONAMA (2005) [6] destes componentes.

Com essa pesquisa, pôde-se concluir que a plataforma MOHID Land pode ser utilizada para o estudo do transporte de contaminantes nos corpos hídricos, sendo uma ferramenta de gestão

e auxílio a tomada de decisão para engenheiros e entidades públicas que buscam adotar medidas de controle da poluição ao meio ambiente.

Espera-se que este trabalho contribua no entendimento das funcionalidades do MOHID Land, para que, aliado a boa técnica de modelagem, auxilie a previsão da contaminação hídrica, dê suporte ao planejamento, torne possível garantir a segurança pública e crie um ambiente que minimize os efeitos nocivos da agricultura aos recursos hídricos.

Futuramente, pode-se analisar outros componentes agrícolas que são utilizados nas plantações e sua concentração nos recursos hídricos. Em complemento, sugere-se acompanhar todo o crescimento de uma plantação no MOHID Land, visando, com a simulação de um maior período de plantação, garantir uma colheita mais sustentável, aquela que, mantenha a produção e agrida o mínimo possível o meio ambiente.

Referências

- [1] JIANG, F. Reallocating crop rotation patterns improves water quality and maintains crop yield. **Agricultural Systems**, v. 187, p. 103015, 1 fev. 2021.
- [2] LUNA, F. V.; KLEIN, H. S. Transformações da agricultura brasileira desde 1950. **História Econômica & História de Empresas**, v. 22, n. 2, 19 dez. 2019.
- [3] LONGHINI, V. Z. et al. Mathematical models for adjustments in the quantification of ammonia volatilization from urea fertilizer applied on tropical pastures. **Ciência Rural**, v. 54, n. 5, p. e20230230, 2024.
- [4] MAZUR, R. et al. A *Lymnaea stagnalis* Embryo Test for Toxicity Bioindication of Acidification and Ammonia Pollution in Water. **Water**, v. 8, n. 7, p. 295, jul. 2016.
- [5] RODHE, H. Acidification in a Global Perspective. **Ambio**, v. 18, n. 3, p. 155–160, 1989.
- [6] CONAMA. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 18 mar. 2005. Seção 1, p. 58-63.** Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res_conama_357_2005_classificacao_corpos_agua_rtfcd_a_altrd_res_393_2007_397_2008_410_2009_430_2011.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2024.
- [7] GOMES, M. A. F.; BARIZON, R. R. M. Panorama da Contaminação Ambiental por Agrotóxicos e Nitrato de origem Agrícola no Brasil: cenário 1992/2011. 2014.
- [8] SANDU, M. et al. Non-ionized ammonia pollution level of the small rivers water in the Central Development Region of the Republic of Moldova. **Present Environment and Sustainable Development**, p. 251–259, 2022.
- [9] ZHANG, W. et al. Influence of rapid rural-urban population migration on riverine nitrogen pollution: perspective from ammonia-nitrogen. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 35, p. 27201–27214, 1 dez. 2017.

- [10] ASIH, E. N. N. et al. Concentration of Ammonia Pollution in Madura Traditional Salt Production Water. **Omni-Akuatika**, v. 18, n. S1, p. 53–58, 18 abr. 2022.
- [11] ONU. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável | As Nações Unidas no Brasil**. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 19 fev. 2024.
- [12] ONU. **Organização das Nações Unidas. Crise hídrica global lança países em busca por novas fontes de água | ONU News**. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2024/01/1826487>>. Acesso em: 11 mar. 2024.
- [13] CHAMBEL-LEITÃO, P. et al. Integration of MOHID Model and Tools with SWAT Model. **Proceedings of The IEEE - PIEEE**, 1 jan. 2007.
- [14] SIMIONESEI, L. et al. Modeling Soil Water Dynamics and Pasture Growth in the Montado Ecosystem Using MOHID Land. **Water**, v. 10, n. 4, p. 489, abr. 2018.
- [15] ALEMAYEHU, T. et al. An improved SWAT vegetation growth module and its evaluation for four tropical ecosystems. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 9, p. 4449–4467, 7 set. 2017.
- [16] NEITSCH, S. L. et al. **Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009**. [s.l.] Texas Water Resources Institute, set. 2011. Disponível em: <<https://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/128050>>. Acesso em: 27 jan. 2022.
- [17] NEITSCH, S. Appendix A: Databases. 2012. Disponível em: <https://oaktrust.library.tamu.edu/bitstream/1969.1/128050/1/TR-406_Soil%20and%20Water%20Assessment%20Tool%20Theoretical%20Documentation.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2022.
- [18] WORQLUL, A. W. et al. Multi-Dimensional Evaluation of Simulated Small-Scale Irrigation Intervention: A Case Study in Dimbasinia Watershed, Ghana. **Sustainability**, v. 10, n. 5, p. 1531, maio 2018.
- [19] WABELA, K. et al. Optimization of Irrigation Scheduling for Improved Irrigation Water Management in Bilate Watershed, Rift Valley, Ethiopia. **Water**, v. 14, n. 23, p. 3960, jan. 2022.
- [20] ZANETTI, S. S. **MODELAGEM HIDROLÓGICA EM MICROBACIA HIDROGRÁFICA DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL**. 2007.
- [21] MACIEL, C. P. et al. Diagnóstico multidisciplinar de um ambiente de trabalho rural em Varre-Sai - RJ, como subsídio à construção coletiva de soluções. **Revista Vértices**, v. 14, n. 1, p. 7–18, 23 mar. 2012.
- [22] RAMOS, T. B. et al. Assessing the Impact of LAI Data Assimilation on Simulations of the Soil Water Balance and Maize Development Using MOHID-Land. **Water**, v. 10, n. 10, p. 1367, out. 2018.
- [23] SONG, J. et al. Integrated Economic and Environmental Assessment of Cellulosic Biofuel Production in an Agricultural Watershed. **BioEnergy Research**, v. 10, n. 2, p. 509–524, 1 jun. 2017.

[24] MENDES, M. et al. **Caracterização detalhada de um perfil de Latossolo Amarelo sob cafezal (Coffea arabica L.) no município de Varre-Sai - Rio de Janeiro - Brasil.** [s.l: s.n.].

Consequências dos fenômenos climáticos de 2023 sobre o igarapé do Turumã-Açu em Manaus, Amazonas, Quanto ao Transporte Hidroviário
Consequences of the 2023 climatic phenomena on the Turumã-Açu Stream in Manaus, Amazonas, Regarding Hydrological Transportation

Ládson Danley Aguiar Vale, Graduando em Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas - IFAM, Campus Manaus Centro.

ladsondanley@gmail.com

Jussara Socorro Cury Maciel, Professora Doutora, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas - IFAM, Campus Manaus Centro.

jussara.maciel@ifam.edu.br

Resumo

Este artigo investiga as consequências dos fenômenos climáticos El Niño e aquecimento do Atlântico Norte em 2023 sobre o igarapé do Turumã-Açu, em Manaus, Amazonas. O estudo foca nos impactos da seca no transporte hidroviário e portuário, utilizando uma abordagem analítica baseada em dados pluviométricos e registros fotográficos. A metodologia inclui análise de dados meteorológicos e hidrológicos fornecidos por instituições, como Inmet e Inpe, além de observações diretas *in loco*. A pesquisa indica uma correlação significativa entre os eventos climáticos e a redução da profundidade hídrica do igarapé, afetando a navegabilidade e a infraestrutura de transporte hidroviário. Este trabalho tem como objetivo contribuir para o entendimento dos efeitos locais das mudanças climáticas, estabelecendo uma relação entre a navegabilidade e o baixo índice de chuvas causado pelas mudanças climáticas.

Palavras-chave: Turumã-Açu, El Niño, hidroviárias.

Abstract

This article investigates the consequences of the El Niño climatic phenomenon and the North Atlantic warming in 2023 on the Turumã-Açu stream in Manaus, Amazonas. The study focuses on the impacts of drought on waterway and port transportation, using an analytical approach based on rainfall data and photographic records. The methodology includes the analysis of meteorological and hydrological data provided by institutions such as Inmet and Inpe, as well as direct on-site observations. The research indicates a significant correlation between the climatic events and the reduction of the stream's water depth, affecting navigability and waterway transport infrastructure. This work aims to contribute to the understanding of the local effects of climate change, establishing a relationship between navigability and the low rainfall index caused by climate change.

Keywords: Turumã-Açu, El Niño, hydrological.

1. Introdução

O igarapé do Turmã-Açu desempenha um papel crucial tanto na ecologia quanto no transporte hidroviário local em Manaus. Como uma rota de navegação importante, conectando portos locais a flutuantes utilizados para atividades recreativas e ancoragem de pequenas embarcações. No entanto, o ano de 2023 foi marcado pela coincidência de dois fenômenos climáticos significativos: o El Niño e o aquecimento do Atlântico Norte. Ambos são conhecidos por suas consideráveis influências nos padrões climáticos globais, incluindo a alteração dos regimes de precipitação acima da linha do equador.

Dentro do contexto específico de Manaus, destaca-se o efeito adverso dos fenômenos climáticos, os quais restringiram a precipitação na cidade. Esse contexto influenciou diretamente o igarapé do Turmã-Açu, alterando sua profundidade hídrica, a capacidade de navegação e o emprego da infraestrutura voltada ao transporte aquático.

Este trabalho justifica-se pela importância de registrar e entender o impacto dos fenômenos climáticos no sistema de transporte hidroviário local, com enfoque particular no igarapé do Turmã-Açu. A importância deste estudo se baseia na intenção de preencher uma lacuna entre os efeitos decorrentes dos eventos climáticos de 2023 em uma hidrovia em Manaus. Através de análise observacional e evidências fotográficas, busca-se fornecer *insights* significativos para a região, explorando um campo de estudo ainda não amplamente investigado.

A metodologia envolveu uma pesquisa bibliográfica abrangente em artigos científicos, reportagens e boletins de monitoramento climático, análise de dados do Portal HidroWeb, uma plataforma com acesso a informações nacionais sobre níveis fluviais, vazões, chuvas, clima, qualidade da água e sedimentos, além do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), e visitas ao local durante a estigagem para fotodocumentação das mudanças no igarapé ao longo do tempo.

Este artigo tem como objetivo apresentar um estudo e os registros fotográficos dos impactos causados pela seca originada pelos eventos climáticos de 2023 no Igarapé do Turmã-Açu em Manaus pela perspectiva hidroviária e portuária do igarapé.

2. Pesquisa Bibliográfica

A metodologia da pesquisa deste artigo foi elaborada para proporcionar uma compreensão clara e detalhada das relações entre os eventos climáticos simultâneos de 2023 e a escassez hídrica na região Norte do Brasil. Para isso, foi conduzida uma pesquisa bibliográfica abrangente, que incluiu a análise de artigos científicos, reportagens e boletins de monitoramento climático emitidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet) e pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe).

Com o intuito de compreender a origem da escassez hídrica na região Norte, precisa-se entender o conceito de dipolo do Atlântico e suas interações com o fenômeno El Niño, que resultaram em efeitos como a pouca precipitação de chuvas nas regiões Norte e Nordeste do Brasil.

O primeiro conceito fundamental para a compreensão dos fenômenos estudados nesta pesquisa é o dipolo do Atlântico, conforme descrito por Nóbrega (2014) e Robles (2023). Esse fenômeno refere-se ao aquecimento anômalo das águas do Oceano Atlântico Tropical Norte, localizadas logo acima da linha do equador. Essa alteração é identificada como uma mudança significativa na temperatura da superfície da água do mar na região.

O segundo fenômeno é o El Niño, conforme Cavalcanti (1996) e Grimm (2015), é evento climático, que se caracteriza pelo aquecimento das águas do Oceano Pacífico Equatorial, resultando em mudanças climáticas globais. Essas mudanças incluem invernos mais quentes e secas no Brasil, particularmente nas regiões Norte e Nordeste.

A consequência da ocorrência simultânea dos dois eventos climáticos é corroborada por Garcia e Calgaro (2023) e De Araújo Costa (2014), que descrevem a seca extrema nos rios amazônicos como resultado da combinação dos fenômenos climáticos: o El Niño, que provoca o aquecimento das águas do oceano Pacífico, e o calor no oceano Atlântico Norte. Em anos intensos, o El Niño influencia a circulação oceânica do Atlântico, impactando os padrões pluviométricos e as temperaturas em várias partes do mundo. Conforme destacado por Aragão (1998), os fenômenos climáticos exercem influência sobre os padrões pluviométricos e as temperaturas em diversas regiões do mundo, e a combinação desses fatores resulta na redução da precipitação no Norte e Nordeste do Brasil.

De acordo com Greenpeace (2023) e Garcia (2023), as secas extremas foram impulsionadas pelas mudanças climáticas exacerbadas pelo El Niño, causando um grande impacto na Amazônia. Isso resultou em uma escassez hídrica que impossibilitou o uso dos transportes fluviais em rios vitais para a região. Silva et al (2012) corroboram, apontando que o El Niño afeta o clima nacional, reduzindo a precipitação no Norte do país.

Segundo o Inmet (2023a), esperava-se uma diminuição na precipitação de chuvas nas regiões Norte e Nordeste devido ao El Niño, o que comprometeria a capacidade de armazenamento de água no solo nessas áreas, resultando em uma severa seca e impactando diretamente a capacidade de navegação fluvial. A maioria dos estados brasileiros registrou escassez de chuvas em outubro de 2023, conforme observado pelo Inmet (2023b), sendo notável o baixo índice na Região Norte, especialmente no centro-oeste dessa área, conforme o Inpe (2023).

A pesquisa bibliográfica realizada revela que as previsões meteorológicas realizadas pelo Inmet e Inpe são conduzidas pelo CPTEC, um sistema de computação que se baseia em dados provenientes dos satélites Meteosat e Goes, da rede de dados da Organização Meteorológica Mundial (WMO) e das redes nacionais supervisionadas pelo INMET, conforme aponta o Inpe (2010). Além disso, a principal ferramenta empregada pelos institutos para monitorar o nível dos rios é o Portal HidroWeb. De acordo com Brasil (2023), o portal faz parte do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) e proporciona acesso ao banco de dados que abrange todas as informações coletadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), reunindo dados sobre níveis fluviais, vazões, precipitações pluviométricas, climatologia, qualidade da água e sedimentos.

3. Estudo Pluviométrico Igarapé do Turumã-Açu

Para proporcionar um melhor entendimento do local da bacia hidrográfica do igarapé do Turumã-Açu, assim como da distribuição e do déficit de chuva na região durante o período entre agosto de 2023 e março de 2024, recorreu-se ao uso do Portal HidroWeb para gerar a figura 2, e a ferramenta CPTEC para gerar o gráfico 1.

A figura 1 mostra a localização da bacia hidrográfica onde encontra-se o igarapé do Turumã-Açu. A bacia está situada em uma região a oeste na cidade de Manaus, e é utilizada como uma via de transporte hídrico e local para atracamento de embarcações.

A imagem apresentada na figura 2 foi gerada a partir dos dados do satélite Merge do CPTEC com auxílio do portal HidroWeb. Esta imagem oferece uma representação visual da

distribuição da chuva na região noroeste do Amazonas no período entre agosto de 2023 e Março de 2024, a seta para baixo indica a localização da cidade de Manaus, onde encontra-se o igarapé do Turumã-Açu, objeto de estudo neste artigo.

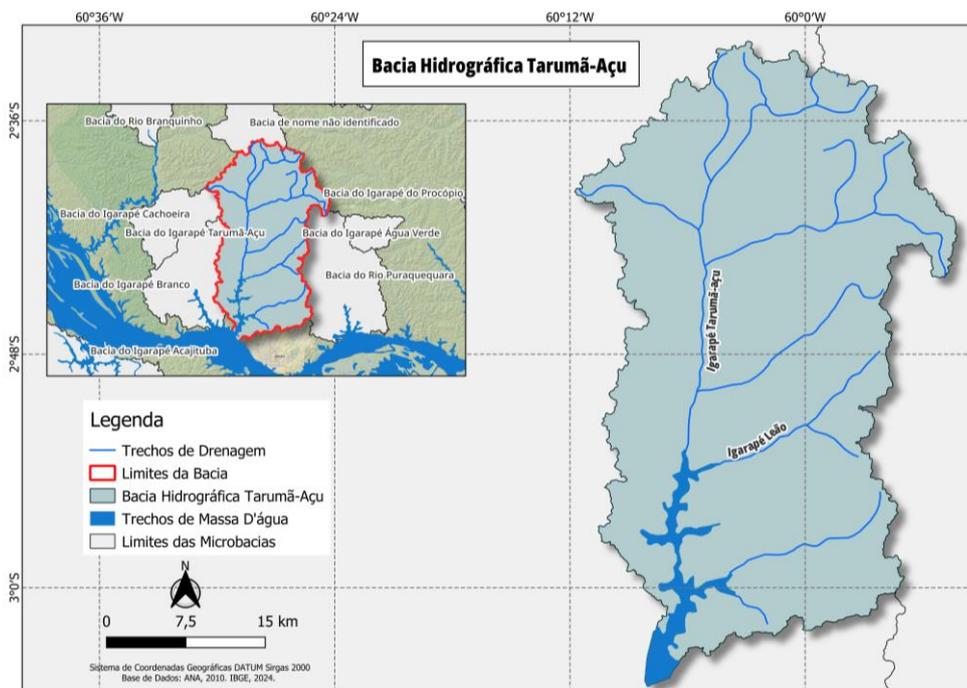


Figura 1: Bacia do Igarapé Turumã-Açu. Fonte: próprios autores.

As cores da imagem variam conforme a intensidade da chuva. As áreas vermelhas indicam chuva abaixo do esperado, com tons mais escuros indicando deficiência significativa. Já as áreas azuis representam chuva significativa, com tons mais escuros indicando maior precipitação.

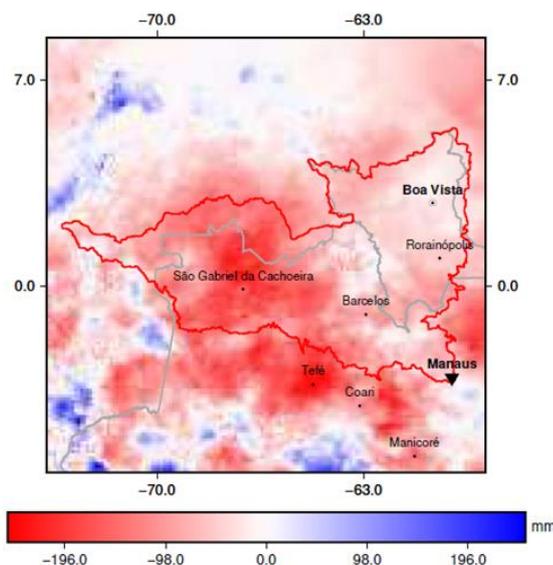
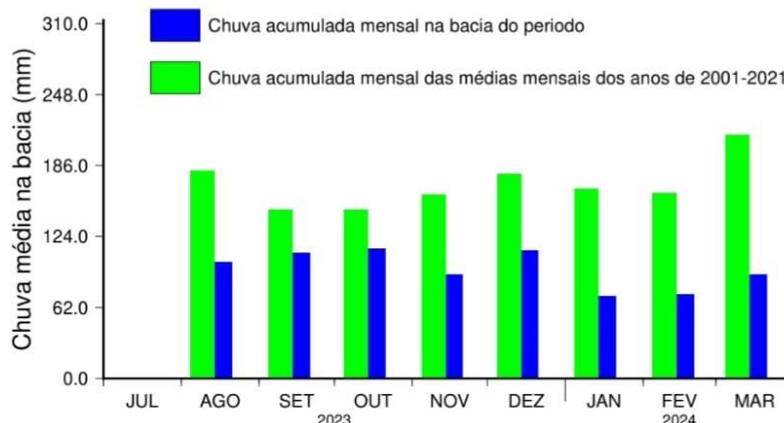


Figura 2: Anomalia de chuva MERGE (CPTEC-INPE). Fonte: Adaptado de CPTEC/INPE (2023).

Para ilustrar os efeitos potenciais do El Niño no igarapé do Turumã-Açu, foi criado gráfico comparativo. Ele contrasta a média de chuvas entre os anos 2001 a 2021 com os níveis de chuva de agosto de 2023 a março de 2024. A análise revela que, durante esse período,

houve uma redução nos índices de chuva, especialmente em março, comparado com os anos anteriores.

Gráfico 1: Comparativo entre a média de chuva entre 2001-2021 e 2023



Fonte: Adaptado de Cptec/Inpe (2023). Gerado por SGB em março de 2024.

4. Igarapé do Turumã-Açu

Neste tópico são apresentadas as mudanças ao longo do tempo no igarapé do Turumã-Açu, utilizando fotografias capturadas em pontos de observação específicos. As imagens revelam a evolução das condições do igarapé, as observações dos impactos da estiagem e recuperação do nível da água.

Em relação à localização geográfica as fotografias foram capturadas a partir da intersecção das coordenadas geográficas 3°00'53"S e 60°05'36"W.

A Figura 3 apresenta um flutuante ancorado no igarapé do Turumã-Açu, usado como ponto de atracação para embarcações de pequeno porte, como lanchas rápidas, lanchas expressas (a jato) e motos aquáticas. Esta imagem proporciona uma perspectiva inicial das condições fluviais antes do agravamento da estiagem, servindo como um marco temporal para compreender as transformações ao longo do período seco.

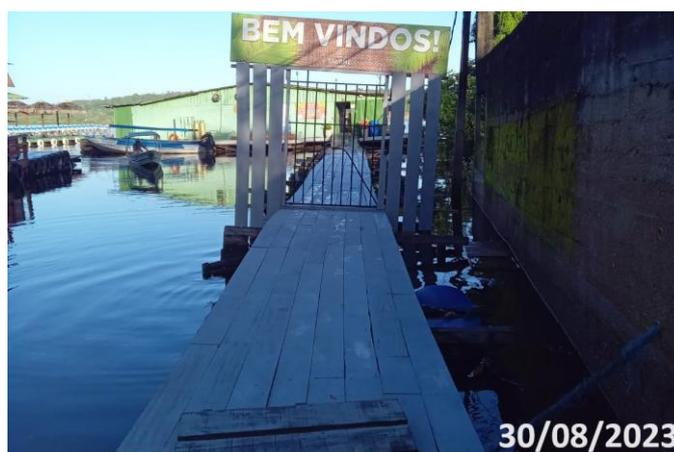


Figura 3: Flutuante localizado no igarapé do Turumã-Açu, Manaus. Fonte: próprios autores.

A figura 4 mostra uma foto do igarapé do Turumã-Açu em setembro de 2023, no início da estiagem. Embarcações de médio e grande porte são visíveis, usadas para transporte de pessoas.

Devido à estiagem, o leito de inundação do rio torna-se visível, e em processo de escoamento. Também observou-se *in loco* na data 29 de novembro de 2023 o recuo da margem do rio, e a mudança de posição de atracamento dos flutuantes e embarcações em relação a visita realizada no dia 30 de agosto de 2023.



Figura 4: Igarapé do Turumã-Açu, Manaus, início da escassez hídrica.. Fonte: elaborado pelos autores.

A Figura 5 mostra a seca do rio e o encalhamento dos flutuantes devido à combinação do escoamento da água e períodos prolongados de estiagem, a tentativa e dificuldade de navegação observadas *in loco* a partir de uma canoa motorizada.



Figura 5: Igarapé e Canoa motorizada na escassez hídrica. Fonte: elaborado pelos autores.

Em 20 de março de 2024, averiguou-se que o nível de água do igarapé havia subido, tal observação é corroborada pelo registro visual apresentado na figura 6.



Figura 6: Igarapé do Turumã-Açu, Manaus, início do inverno. Fonte: elaborado pelos autores.

Esta figura marca uma mudança relevante nas condições hidrográficas do igarapé, influenciando diretamente as atividades de transporte hidroviário e permitindo a navegação dos flutuantes e embarcações.

5. Resultados e Discussões

As secas extremas de 2023, atribuídas às mudanças climáticas exacerbadas pelos eventos climáticos de 2023, tiveram impactos significativos na região amazônica, afetando um importante igarapé para o transporte hidroviário em Manaus. Estudos e relatórios demonstram como o El Niño influencia diversas regiões, incluindo o Brasil, resultando em invernos mais quentes e períodos de seca no Norte e Nordeste. Projeções do Instituto Nacional de Meteorologia indicam diminuição na precipitação de chuvas nessas áreas, exacerbando o déficit hídrico e afetando a navegação fluvial. Em setembro de 2023, a escassez de chuvas foi observada em grande parte do Brasil, especialmente no Norte, marcando o início de uma escassez hídrica histórica.

As fotografias capturadas próximas à intersecção das coordenadas 3°00'53"S e 60°05'36"W revelam a transformação do igarapé do Turumã-Açu, em Manaus, ao longo de diferentes estágios hídricos. Desde um período de cheia, evidenciado pela presença de flutuantes e embarcações menores na figura 3, até uma seca severa representada na figura 5, onde os flutuantes encalharam devido à redução drástica do nível da água e a tentativa de navegação em condições adversas é ilustrada com uma canoa motorizada enfrentando dificuldades. Por fim, a figura 6 mostra o retorno das condições favoráveis à navegação, simbolizando o ciclo natural do igarapé. Essas observações destacam a importância de planejamento e gestão ambiental para preservar os ecossistemas e garantir a sustentabilidade.

Para melhor representar a influência do índice de chuvas causadas pelos eventos climáticos e sua relação com a navegabilidade do rio, apresenta-se a Figura 7. Esta figura abrange a chuva acumulada no período de 2001 a 2021, em verde, em comparação com o intervalo em estudo entre agosto de 2023 e março de 2024, em azul. Além disso, é apresentado um registro fotográfico com a situação do igarapé em cada período, evidenciando as mudanças nos níveis de água e a navegabilidade associada a essas variações de precipitação.

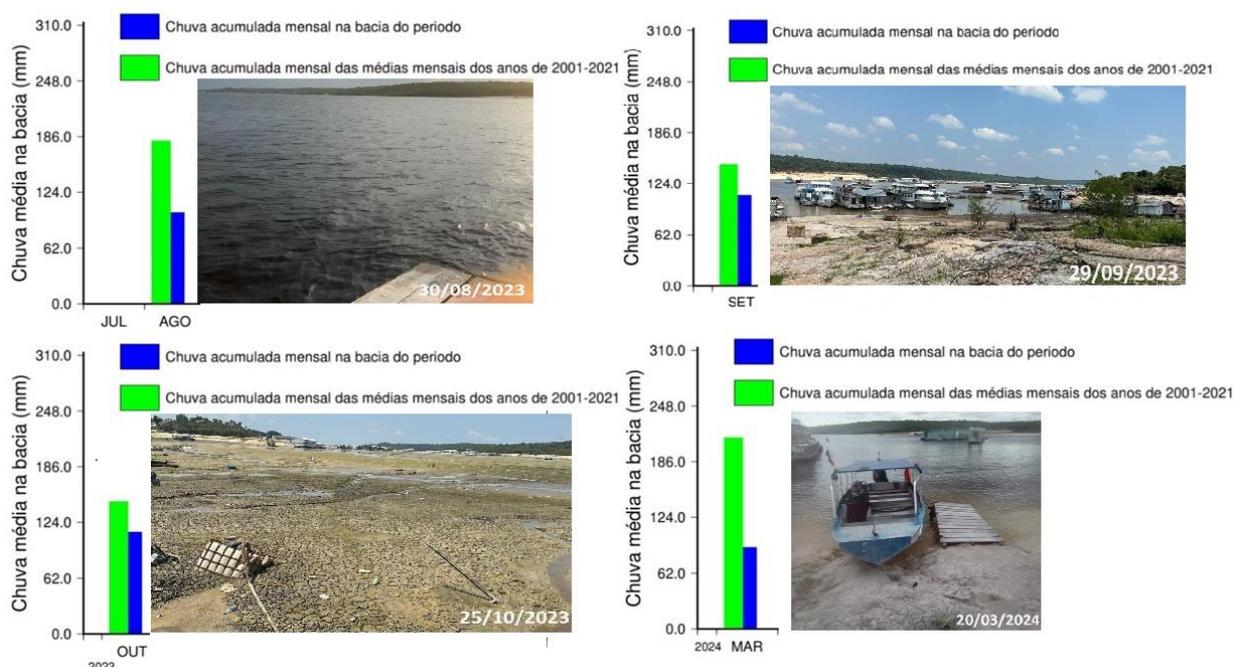


Figura 7: Relação com a navegabilidade e índice de chuvas . Fonte: organizado pelos autores.

Em agosto, a chuva acumulada entre 2001 e 2021 foi próxima de 186 mm, enquanto no período de 2023 registrou-se um acumulado abaixo de 124 mm, refletindo uma redução significativa na precipitação mensal. Em setembro, observou-se que a chuva, entre 2001 e 2021, estava acima de 124 mm, ao passo que no período de 2023 ficou abaixo desse valor. Em outubro, houve uma acumulação de chuva superior a 124 mm nos anos entre 2001 e 2021, contrastando com o período de 2023, que registrou um acumulado de chuva abaixo de 124 mm. Em março, a chuva acumulada foi de mais de 186 mm entre 2001 e 2021, enquanto no período de 2023 houve um acumulado abaixo de 124 mm.

A análise desses dados evidencia o impacto dos fenômenos climáticos na navegabilidade do Igarapé, destacando a influência direta da quantidade de chuvas nos diferentes períodos analisados. A partir da figura 7, torna-se perceptível que a quantidade de chuva é um fator crucial para manter os níveis de água adequados para a navegação em Igarapés. A redução nas chuvas registradas em 2023, comparada com a média dos anos anteriores, sugere uma tendência de seca que afetou severamente a navegabilidade. Menos chuva resulta em níveis de água mais baixos, o que impossibilitou a navegação em certos trechos durante períodos críticos, como o mês de outubro.

Os resultados revelam impactos significativos nas condições hídricas do Igarapé, afetando a navegação e a infraestrutura hidroviária local. As fotografias documentam a transformação do Igarapé ao longo de diferentes estágios hídricos, desde períodos de cheia até uma seca severa. No entanto, os resultados são discutidos à luz do contexto das mudanças climáticas e da importância da gestão ambiental. É enfatizada a necessidade de estratégias de adaptação e gestão de riscos frente aos desafios das mudanças climáticas. Destaca-se a urgência de desenvolver estratégias de adaptação e gestão de riscos diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas, não apenas para Manaus, mas para regiões que enfrentam desafios semelhantes em todo o mundo.

6. Considerações Finais

A análise dos registros fotográficos dos impactos causados pela seca decorrente dos eventos climáticos no Igarapé do Turmã-Açu, em Manaus, revela a interconexão entre as condições climáticas globais e a infraestrutura hidroviária local. O papel crucial desempenhado pelo Igarapé como rota de navegação e ancoragem de embarcações recreativas é fundamental para compreender a importância deste estudo. Ao destacar as implicações diretas dos eventos climáticos na profundidade da água, na navegabilidade e no uso da infraestrutura hidroviária, este trabalho preenche uma lacuna significativa no entendimento dos efeitos desse fenômeno em nível local.

O impacto direto desses eventos no Igarapé do Turmã-Açu evidencia a necessidade urgente de compreender e mitigar os efeitos das mudanças climáticas em infraestruturas hidroviárias locais.

Este estudo não apenas oferece uma análise detalhada dos impactos dos eventos climáticos no transporte hidroviário local, mas também destaca a importância da observação e registro fotográfico como ferramentas valiosas para documentar e compreender esses efeitos. Os *insights* obtidos fornecem uma base sólida para o desenvolvimento de estratégias de adaptação e gestão de riscos em face das mudanças climáticas. Com a tendência de maior frequência e intensidade dos fenômenos climáticos, destaca-se a urgência de desenvolver estratégias de adequação aos desafios impostos pelas mudanças climáticas, não apenas para Manaus, mas para regiões que enfrentam desafios semelhantes em todo o mundo.

Referências

- [1] Nóbrega, Ranyére Silva; SANTIAGO, Gabriela Ayane Chagas Felipe. Tendência de temperatura na superfície do mar nos oceanos Atlântico e Pacífico e variabilidade de precipitação em Pernambuco. *Mercator* (Fortaleza), v. 13, p. 107-118, 2014.
- [2] Robles, Tiago. Aquecimento simultâneo dos oceanos Pacífico e Atlântico pode agravar seca na Amazônia. *Tempo.com*, 20 set. 2023. Disponível em: <<https://www.tempo.com/noticias/actualidade/aquecimento-simultaneo-dos-oceanos-pacifico-e-atlantico-pode-agravar-seca-na-amazonia-clima.html#:~:text=Trata%2Dse%20do%20aquecimento%20das,de%20chuvas%20na%20regi%C3%A3o%20amaz%C3%B4nica>>. Acesso em: 20 set. 2023.
- [3] Cavalcanti, Iracema FA. Episódios El Niño/Oscilação Sul durante a década de 1986 a 1996 e suas influências sobre o Brasil. *Climanálise Especial*, 1996.
- [4] Grimm, Alice M.; ACEITUNO, Patricio. El niño, novamente!. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 30, p. 351-357, 2015.
- [5] Garcia, Mariana; Calgaro, Fernanda. Seca fora do normal em rios da Amazônia tem relação com El Niño e aquecimento do Atlântico Norte. *G1*, 28 set. 2023, 13h07. Disponível em: < <https://g1.globo.com/meio-ambiente/noticia/2023/09/28/seca-fora-do-normal-em-rios-da-amazonia-tem-relacao-com-el-nino-e-aquecimento-do-atlantico-norte-entenda.ghtml> >. Acesso em: 28 set. 2023.
- [6] De Araújo Costa, José. O fenômeno El Niño e as secas no Nordeste do Brasil. 2014.
- [7] Aragão, José Oribe Rocha de. O Impacto do ENSO e do Dipolo do Atlântico no Nordeste do Brasil. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, v. 27, n. 3, p. 839-844, 1998.
- [8] Greenpeace, Brasil. Seca na Amazônia: A outra face dos eventos climáticos extremos. *Greenpeace Brasil Blog*. 2023. Disponível em: https://www.greenpeace.org/brasil/blog/seca-na-amazonia-a-outra-face-dos-eventos-climaticos-extremos/?appeal=21057&utm_source=google&utm_medium=paid&utm_campaign=clima&utm_content=aq_20231004_grants&utm_term=secas%20extremas&utm_campaign=&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=7235609613&hsa_cam=19664562138&hsa_grp=157161332631&hsa_ad=676161598721&hsa_src=g&hsa_tgt=kwd-2119362779967&hsa_kw=secas%20extremas&hsa_mt=b&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gad_source=1&gclid=EAIaIQobChMIrPztjdOKhQMVb2FIAB0puQLXEAAAYASAAEgIoMvD_BwE. Acesso em: 23 de março de 2024.
- [9] Garcia, Camilly et al. A ESCASSEZ HÍDRICA NA REGIÃO NORTE. *Semana da Diversidade Humana* (ISSN: 2675-1127), v. 8, n. 1, 2023.
- [10] Silva, Igor Antônio; MENDES, Paulo Cezar. O EL NIÑO E SUA INFLUÊNCIA NAS TEMPERATURAS E PRECIPITAÇÕES NA CIDADE DE UBERLÂNDIA (MG). *REVISTA GEONORTE*, v. 3, n. 9, p. 485–495-485–495, 2012.
- [11] Inmet, INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. El Niño 2023: Boletim de novembro, Saiba detalhes sobre o monitoramento, previsões e os possíveis impactos do fenômeno no Brasil na edição nº 3 divulgada nesta quarta-feira (22). 2023a .Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/el-ni%C3%B1o-2023-boletim-de-novembro>. Acesso em: 24 mar. 2024.

- [12] Inmet, INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. El Niño 2023: Boletim de outubro, saiba detalhes sobre o monitoramento, previsões e os possíveis impactos do fenômeno no Brasil. 2023b. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/el-ni%C3%B1o-2023-saiba-detalhes-sobre-o-monitoramento-previs%C3%B5es-e-os-poss%C3%ADveis-impactos-do-fen%C3%B4meno-no-brasil-2>. Acesso em: 24 mar. 2024.
- [13] Inpe, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2023. Nota técnica conjunta CPTEC/Inpe e Inmet Condições de déficit de chuva na Amazônia. Disponível em: https://clima.cptec.inpe.br/gpc/pdf/Nota_seca_AMZ_2023_INPE-INMET_04out2023.pdf. Acesso em: 25 de março de 2024.
- [14] Inpe, INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. 2010. Sobre o CPTEC. Disponível em: <<https://www.cptec.inpe.br/sobreocptec.shtml>>. Acesso em: 25 mar. 2024
- [15] Brasil. Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH). Séries Históricas. 2023. Disponível em: < <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas> >. Acesso em: 25 março de 2024.

Influência do uso da areia natural no índice de consistência e resistência à compressão de compósitos cimentícios produzidos com CP-V e CP-III

Influence of natural sand in consistency and compressive strength of cementitious composites produced with CP-V and CP-III

Vinícius Theiss Provatti, estudante de graduação em Engenharia Civil, UFMG

viniciusprovatti@ufmg.br

Juliana Jianhuan Li, estudante de graduação em Engenharia Civil, UFMG

julianajli@ufmg.br

Thiago Ewerton Cobra de Castro, estudante de graduação em Engenharia Civil, UFMG

thiagoeccastro@ufmg.br

Fernando C.R. Almeida, professor adjunto do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, UFMG

fernando@demc.ufmg.br

Resumo

A alta demanda de produção do concreto gera preocupações sobre a escassez regional de agregados como a areia. As características resistentes da areia dependem diretamente do local de origem. Este artigo avalia a influência do uso de areia natural (em comparação à areia normalizada brasileira) nas propriedades do estado fresco e endurecido de compósitos cimentícios empregando dois tipos de cimento Portland, CP-V e CP-III. Os resultados mostraram que o índice de consistência é menor para argamassas com areia natural e CP-V. Apesar de estatisticamente equivalentes, os valores absolutos de resistência à compressão aos 28 dias de argamassas com areia natural parecem ser similares ou ligeiramente superiores àqueles medidos para argamassas com areia normal brasileira. Isso pode estar relacionado com a maior presença de partículas finas, tanto na areia natural quanto no cimento CP-V. Portanto, salienta-se a importância do entendimento adequado de cada material na trabalhabilidade e desempenho mecânico do concreto.

Palavras-chave: Areia natural; Cimento Portland; Compressão

Abstract

The high demand for concrete production raises concerns about regional shortages of aggregates such as sand. The strength characteristics of sand depend directly on its origin. This article evaluates the influence of using natural sand (compared to standardized Brazilian sand) on the properties of fresh and hardened state of cementitious composites employing two types of Portland cement, CP-V and CP-III. The results show that the consistency index is lower for mortars with natural sand and CP-V. Although statistically equivalent, the absolute values of compressive strength at 28 days for mortars with natural sand appear to be similar or slightly higher than those measured for mortars with Brazilian standardized sand. This may be related to the higher presence of fine particles, both in natural sand and in CP-V cement. Therefore, the importance of proper understanding of each material in the workability and mechanical performance of concrete is emphasized.

Keywords: Natural sand; Portland cement; compressive strength

1. Introdução

Em 2021, a indústria da construção civil gerou R\$377,8 bilhões em valor de incorporações, obras e serviços, e empregou cerca de 2,5 milhões de pessoas, correspondendo a 5,86% do total dos trabalhos formais no país [1]. A pesquisa anual da Indústria da Construção (PAIC) de 2021, publicada em 2023[2], destacou a construção de edifícios como a principal atividade do setor, representando 44,6% do valor total gerado (R\$ 168,6 bilhões) e contando com o maior número de pessoas ocupadas (807,7 mil); seguida pelas obras de infraestrutura, que contribuíram com R\$ 122,4 bilhões.

É evidente que o concreto é o principal material utilizado na realização dessas construções. Com o índice de consumo atual estimado em cerca de 11 bilhões de toneladas/ano, suas amplas aplicações se justificam pela excelente resistência e durabilidade, adequação em diferentes formas, e baixo custo [3]. O concreto é um material compósito constituído por cimento, agregado graúdo, agregado miúdo, e água, podendo conter aditivos. O cimento Portland, composto principalmente por silicatos e aluminatos de cálcio, é o principal aglomerante hidráulico utilizado na produção de concretos [5]. Ele é obtido pela calcinação de nódulos de calcário argiloso, seguido pelo processo de queima na temperatura de clínquerização, e subsequente moagem. Durante esse processo, são geradas cerca de 36% dos 7,7 bilhões de toneladas de CO₂, principal gás do efeito estufa (GEE), liberadas pelas atividades de construção [6]. As emissões de GEE equivalem a aproximadamente 0,31 kg de CO₂ por kg de cimento fabricado, sendo a etapa de calcinação na produção de clínquer a principal fonte geradora, devido aos processos de combustão e decomposição da rocha calcária [7].

Perante essa situação, existem estudos que buscam novas fontes de materiais cimentícios suplementares para desenvolver cimentos com baixo teor de clínquer, a fim de reduzir as emissões de GEEs e melhorar a sustentabilidade do setor construtivo [8][9]. Tais ações se inserem no escopo do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, Iniciativa de Construção Sustentável e Clima [10]. O uso de escória de alto forno, um subproduto da produção de ferro gusa, tem sido amplamente estudado como um dos principais materiais cimentícios suplementares para substituir parcialmente o cimento Portland (CP) na produção de concretos e argamassas [11][8][9]. No Brasil, o Cimento Portland de Alto-Forno (CP III), com teores de escória entre 35% e 75%, se apresenta como uma alternativa mais ecoeficiente a cimentos com elevados teores de clínquer (acima de 90%), como o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V), de acordo com a NBR 16697:2018 [12].

Além disso, a areia natural pode ser classificada como agregado miúdo com partículas menores que 4,75mm e maiores que 150µm, de acordo com a NBR 7211:2022 [13]. Ela pode ser obtida a partir da desintegração natural ou britagem de rochas, o que causa impacto ambiental significativo na indústria da construção civil. Para satisfazer a demanda de produção de concreto, estima-se que são necessários cerca de 17,5 bilhões de toneladas de agregados, o que leva a preocupações sobre a escassez regional de matérias primas [6]. Entre 1900 e 2000, a demanda por brita, areia e cascalho nos EUA representou cerca de 75% de todas as outras matérias-primas usadas por atividades humanas [14]. Embora os agregados naturais sejam abundantes na Terra, o transporte por longas distâncias é evitado devido ao custo econômico associado. Isso aumenta a pressão local por areia natural e agregados graúdos próximos a áreas urbanas, embora os altos custos e as rigorosas regulamentações ambientais frequentemente empurrem essas atividades para locais mais distantes. Em contrapartida, em países com regulamentações ambientais menos restritas ou pouca fiscalização, a extração não controlada de agregados pode causar danos aos ecossistemas e à biodiversidade [15]. Por exemplo, no

relatório de 2022 do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente revela que a extração de areia dos rios tem causado o aumento da poluição e das inundações, além da diminuição de aquíferos e do agravamento da seca [10]. Adicionalmente, as características resistentes da areia dependem diretamente da jazida em que é retirada, gerando grande variabilidade de acordo com o local de origem.

Embora o concreto seja o material de construção civil mais utilizado no mundo, os compósitos cimentícios apresentam uma notável heterogeneidade, o que dificulta a padronização de comportamentos frente aos diferentes materiais disponíveis no mercado. Por conseguinte, o entendimento adequado da influência de cada material, sobretudo em relação aos tipos de cimento e areia, na trabalhabilidade e desempenho mecânico do concreto ainda é deficiente e passível de investigações. Portanto, este artigo busca avaliar a influência do uso de areia natural (em comparação à areia normalizada brasileira) no índice de consistência e na resistência à compressão de compósitos cimentícios empregando diferentes tipos de cimento Portland, especificamente CP-V e CP-III.

2. Metodologia

2.1. Materiais

Para a produção das argamassas cimentícias, foram utilizados dois tipos de ligantes: cimento Portland de Alto forno resistente a sulfatos (CP III-32-RS) e o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI), conforme Tabela 1.

Tabela 1: Características dos cimentos Portland utilizados

Propriedade	CP III-32 RS	CP V-ARI
Teor de escória de alto forno (%)	35-75	0
Massa específica (g/cm ³)	2,95	2,97
Área específica (Blaine) (cm ² /g)	3.503	4.888
Início de pega (min)	221	143
Fim de pega (min)	262	179
Resistência à compressão (7 dias)	20,8	41,2
Resistência à compressão (28 dias)	36,5	n/a

Fonte: fabricantes

Também foram utilizados dois tipos de agregado miúdo secos: areia natural fina quartzosa, e areia normal brasileira (fornecida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas- IPT). A Figura 1 apresenta as curvas granulométricas das areias utilizadas e classificadas na zona ótima, conforme NBR 7211 (ABNT, 2019) [13].

A fim de se obter uma consistência plástica das argamassas, foi utilizado um aditivo superplastificante *PowerFlow 4000 MC* (MC Bauchemie).

2.2. Métodos

A moldagem dos corpos de prova foi realizada seguindo a norma europeia EN 196-1[16], bem como as avaliações no estado fresco e endurecido das argamassas. O uso de normalização internacional se justifica por esse estudo estar inserido dentro do escopo de uma pesquisa liderada pelo Comité Técnico da RILEM (*The International Union of Laboratories and Experts*

in Construction Materials, Systems and Structures), TC – PHC: Performance testing of Hydraulic Cements.

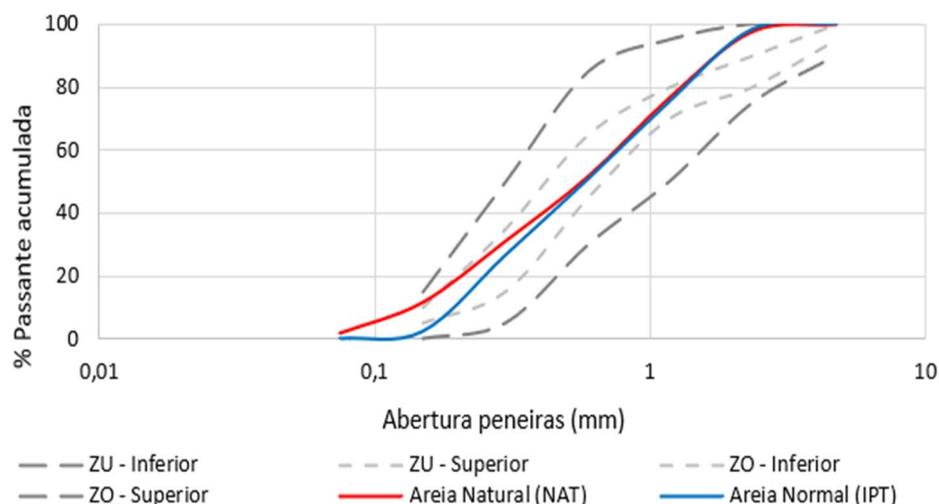


Figura 1: Curvas granulométricas dos agregados miúdos utilizados. Fonte: elaborado pelos autores.

2.2.1. Produção das argamassas

Foram preparados 4 tipos de argamassas, com traço, em massa, de 1:3:0,5 (cimento: areia :água). Aditivo superplastificante foi adicionado para se obter uma consistência plástica acima de 175 mm no ensaio de *Flow Table*, conforme EN 1015-3 (BSI, 1999) [17]. A quantidade de materiais necessários para a moldagem de três corpos de prova prismáticos 40x40x160 mm³ é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2: Quantidade de materiais para o traço: 1 : 3 : 0,5 (cimento : areia : água)

Amostra	Característica	Cimento (g)	Areia (g)	Água (g)	Aditivo (g)
NBR-CPV	Areia normal Cimento CP V	450	337,5 (#16)	225	1,61
			337,5 (#30)		
			337,5 (#50)		
			337,5 (#100)		
NBR-CPIII	Areia normal Cimento CP III	450	337,5 (#16)	225	1,61
			337,5 (#30)		
			337,5 (#50)		
			337,5 (#100)		
NAT-CPV	Areia natural Cimento CP V	450	1.350	225	4,5
NAT-CPIII	Areia natural Cimento CP III	450	1.350	225	4,5

*Nota: a areia normal brasileira (IPT) é constituída de 337,5 g de frações iguais de areia grossa (#16), média grossa (#30), média fina (#50) e fina (#100).

Fonte: Autores.

As argamassas foram preparadas em argamassadeira mecânica e moldadas em formas prismáticas, previamente untadas com óleo desmoldante. Foram dispostas 2 camadas de argamassa, vibrando na mesa vibratória no intervalo entre cada camada, cobertas com plástico filme e armazenadas na câmara úmida (UR = 95% ± 5%, e T = 21 ± 2 °C) por 24h. Em seguida,

as amostras foram desmoldadas e acomodadas novamente na câmara úmida pelos tempos de cura de 1, 2, 7 e 28 dias.

2.2.2. Ensaio de índice de consistência

Logo após a mistura dos materiais, o índice de consistência foi avaliado para as argamassas no estado fresco com e sem aditivo superplastificante. Para isso, realizou-se o teste de *Flow Table*, conforme EN 1015-3 (BSI, 1999) [18]. Preencheu-se um tronco cônico com 3 camadas de argamassa de igual espessura e compactadas manualmente com 5, 10, 15 golpes, respectivamente. Após 30 golpes na mesa de consistência, foram medidos três diâmetros para cada amostra espalhada.

2.2.3. Ensaio de resistência à compressão

No final do período de cura (1, 2, 7 e 28 dias), os corpos de prova de argamassa prismáticos foram serrados em uma serra *Clipper* de bancada em 4 corpos de prova cúbicos idênticos de 40mm de aresta, totalizando 16 corpos de prova por ensaio. Em uma prensa servo eletrônica (*Shimadzu, Autograph AGS-X*), os corpos de prova de dimensões 40x40x40mm foram submetidos a um ensaio de compressão simples a uma velocidade de 0,45MPa/s.

3. Resultados e discussão

Os resultados de consistência das argamassas são apresentados na Figura 2.

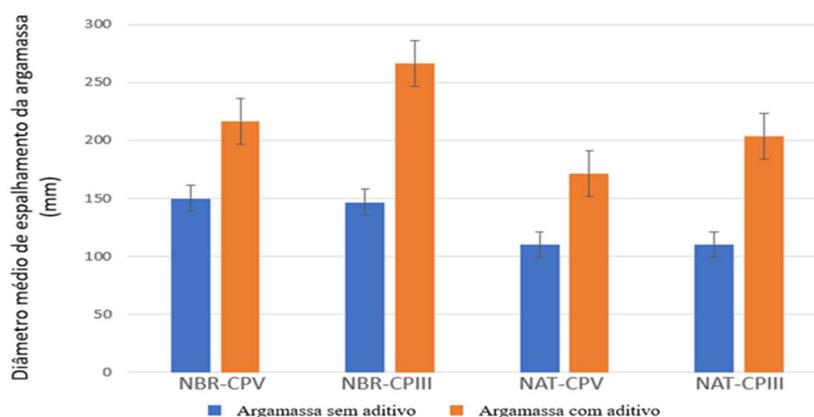


Figura 2: Resultados de consistência das argamassas com e sem aditivo. Fonte: elaborado pelos autores

Pode-se verificar que os diâmetros médios medidos para as argamassas (Figura 3) sem aditivo foram consideravelmente menores (cerca de 85 mm) e, portanto, apresentaram índices de consistência menores. Em geral, argamassas feitas com areia normalizada IPT apresentaram espalhamentos maiores e, portanto, maior fluidez em comparação aos traços com areia natural. Isso pode ser justificado pela maior presença de finos na areia natural (Figura 1), o que levou a uma maior adsorção de água e uma quantidade maior de aditivo superplastificante, diminuindo a fluidez da argamassa fresca.

Além disso, notou-se uma ligeira influência da finura dos cimentos utilizados apenas nas amostras com aditivos. Para as argamassas com CP V (utilizando o mesmo tipo de areia), verificou-se uma redução no valor do espalhamento em comparação à respectiva amostra com

CP III. Isso porque o CP V apresenta maior finura, conforme Tabela 1. Dessa forma, a argamassa com menor índice de consistência foi aquela produzida com areia natural e CP V, mesmo com aditivo superplastificante.

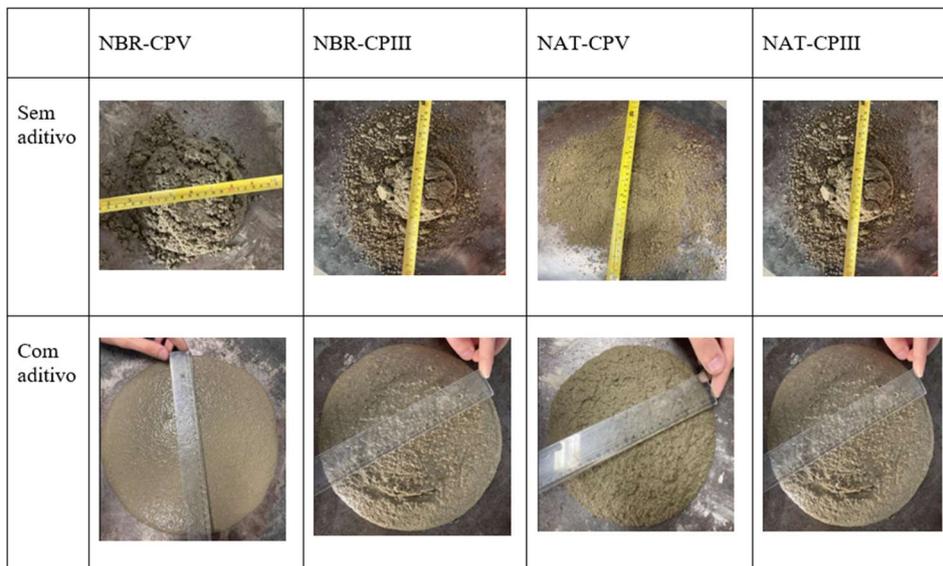


Figura 3: Espalhamento das argamassas na *flow table* após o teste de índice de consistência. Fonte: elaborado pelos autores.

A Figura 4 apresenta os resultados de resistência à compressão das argamassas com areia normal brasileira e areia natural até os 28 dias de idade. As amostras foram moldadas com aditivo superplastificante.

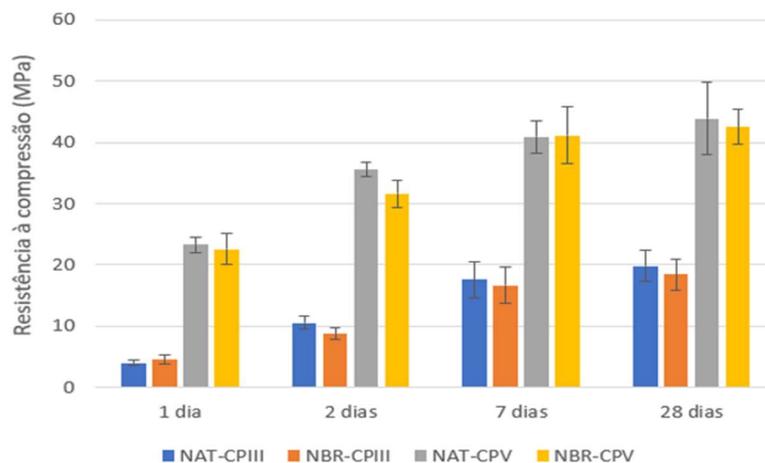


Figura 4: Resultados de resistência à compressão das argamassas. Fonte: elaborado pelos autores

As maiores diferenças entre os valores de resistência se deram nos diferentes cimentos. Como esperado, argamassas com CP V ARI tiveram as maiores resistências à compressão, devido à sua maior finura e maior teor de clínquer em sua composição. O cimento CP III apresenta reações mais lentas para ativação e hidratação dos altos teores de escória granulada de alto forno. Aos 28 dias, as amostras com CP V apresentaram valores de resistência 32,30% maiores do que as com CP III. Além disso, as argamassas com CP V tiveram uma certa

estabilização dos valores de resistência entre as idades de 7 e 28 dias, enquanto aquelas com CP III continuaram a crescer em todas as idades.

Apesar das barras de erros mostrarem resultados similares entre as argamassas com diferentes areias, pode-se verificar uma ligeira tendência da argamassa com areia natural em apresentar valores absolutos maiores de resistência à compressão dos compósitos. Esse aumento médio observado foi aproximadamente de 9,19 %. Isso é atribuído às partículas finas contidas na areia natural, que possibilitaram uma argamassa com melhor empacotamento e, conseqüentemente, uma resistência relativamente maior.

4. Conclusão

A pesquisa com argamassas feitas com cimento CP V e CP III e areias normal e natural, teve como propósito verificar a influência tanto na consistência quanto na resistência à compressão para os diferentes traços. Para o ensaio de consistência, as argamassa com areia normal brasileira apresentaram diâmetros médios de espelhamento de 288,3 mm com cimento CP III e 200,0 mm com cimento CP V, maiores em relação aos respectivos diâmetro médios medidos para as argamassas com areia natural, de 143,3 mm com cimento CP III e 148,3 mm com cimento CP V. Em relação à resistência à compressão, apesar de estatisticamente equivalentes, as argamassas feitas com areia natural (CP V e CP III) obtiveram valores médios absolutos próximos ou ligeiramente superiores àquelas produzidas com areia normal brasileira aos 28 dias de cura. Para argamassas com areia natural, foram observados valores de 19,85 MPa e 29,99 MPa, enquanto as argamassas com areia normal brasileira tiveram valores médios de 18,45 MPa e 26,59 MPa (respectivamente para cimentos CP III e CP V). Conseqüentemente, vê-se a importância de pesquisas e utilizações de materiais de construção locais e naturais, diminuindo a emissão de poluentes, podendo ser utilizadas as argamassas e concretos com areia natural.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG pelo auxílio financeiro.

Referências

- [1] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Pesquisa Anual da Indústria da Construção. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/industria/9018-pesquisa-anual-da-industria-da-construcao.html?=&t=noticias-e-releases>. Acesso em: 12 mar. 2024.
- [2] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Pesquisa Anual da Indústria da Construção: Informativo, volume 31. Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/54/paic_2021_v31_informativo.pdf. Acesso em: 12 mar. 2024.
- [3] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto Microestrutura, Propriedades e Materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.
- [5] NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. 5.ed. Porto Alegre: Editora Bookman, 2016
- [6] HABERT, G. et al. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nature Reviews Earth & Environment*, v. 1, p. 559–573, 2020.

- [7]FORMOSO, C. T.; SOIBELMAN, L. M.; CESARE, C. D.; ISATTO, E. L. Material Waste in Building Industry: Main Causes and Prevention. *Journal of Construction Engineering and Management*, 128, 316-325, 2002.
- [8]JUENGER, M. C. G.; SNELLINGS, R.; BERNAL, S. A. Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. *Cement and Concrete Research*, v. 122, p. 257-273, 2019.
- [9]UN ENVIRONMENT; SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, v.114, p.2-26, 2018.
- [10]UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). *Sand and Sustainability: 10 Strategic Recommendations to Avert a Crisis*. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/38362>. Acesso em: 18 mar. 2024.
- [11]LOTHENBACH, B., SCRIVENER, K., & HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1244-1256, 2011.
- [12]ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16697:2018: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 07/2018.
- [13]ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211:2022: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2019.
- [14]HEARD, R.; HENDRICKSON, C.; MCMICHAEL, F. C. *Sustainable development and physical infrastructure materials*. *MRS Bulletin*, volume 37, páginas 389–394, 2012.
- [15]United Nations Environment Programme (UNEP). *Sand and Sustainability: Finding New Solutions for Environmental Governance of Global Sand Resources*. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/28163>. Acesso em: 18 mar. 2024.
- [16]COMITÊ EUROPEU DE NORMALIZAÇÃO. EN 196-1: *Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength*. Bruxelas, 2016.
- [17]BRITISH STANDARDS INSTITUTION. EN 1015-3: *Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*. Londres, 1999.

REVISÃO SISTEMÁTICA DE ESTUDOS SOBRE A SUSTENTABILIDADE DO PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D
SYSTEMATIC REVIEW OF STUDIES ON THE SUSTAINABILITY OF THE 3D PRINTING PROCESS

Tainá Stempkowski Terra, Mestranda, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

tainaterra94@gmail.com

Beatriz Martins Frasnelli, Mestranda, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

beatrizfreewill@gmail.com

Jocelise Jacques de Jacques, Doutora, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

jocelise.jacques@ufrgs.br

Fábio Gonçalves Teixeira, Doutor, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

fgtdsg@gmail.com

Resumo

A manufatura aditiva se destaca no cenário acadêmico e profissional devido à redução de material e economia de tempo. Apesar disso, enfrenta desafios comuns a avanços tecnológicos. Esta revisão sistemática de literatura analisa o estado atual da manufatura aditiva, propondo soluções para seus desafios. Abordando manufatura aditiva, economia circular e ciclo de vida dos produtos, a revisão contempla todos os estágios do produto gerado por essa tecnologia. Resultados indicam soluções promissoras e preocupações, como emissões de gases na impressão 3D e impacto ambiental de diferentes materiais. Destaca-se a relevância da pesquisa e divulgação para a decisão sobre o uso da manufatura aditiva em vários contextos

Palavras-chave: Impressão 3D; Desenvolvimento sustentável de produto; Design e Tecnologia

Abstract

Additive manufacturing stands out in the academic and professional scene due to material reduction and time savings. Despite this, it faces challenges common to technological advances. This review analyzes the current state of additive manufacturing, proposing solutions to its challenges. Addressing additive manufacturing, circular economy and product life cycle, the review covers all stages of the product generated by this technology. Results indicate promising solutions and concerns, such as gas emissions in 3D printing and the environmental impact of different materials. The relevance of research and dissemination for deciding on the use of additive manufacturing in various contexts is highlighted.

Keywords: 3D printing; Sustainable Product Development; Design and Technology

1. Introdução

Charles Hull [1] definiu a manufatura aditiva, ou impressão 3D como o método de formar objetos em três dimensões através da união de materiais, normalmente através de impressão de camadas bidimensionais. Na manufatura aditiva o projeto começa em um software CAD (Computer Aided Design), tecnologia esta que traz ganhos por estar em formato digital, como diminuição de estoque, menor desperdício de matéria prima. Tendo em vista que o arquivo pode ser impresso a qualquer hora, isso inclui artigos decorativos, peças mecânicas, joalheria, vestuário, entre outros ramos beneficiados pela tecnologia 3D [2]. Gomes [3] afirma que tal tecnologia é a mais adequada para a prototipagem rápida ou aditivo de manufaturamento.

Entre os métodos mais comuns de impressão 3D utiliza-se a modelagem por deposição fundida (FDM), neste método se usa um filamento, termossensível. O filamento se desenrola do carretel e passa pelo bocal da máquina onde será aquecido e ganha a forma de um cordão fino [03]. Assim vão sendo construídas as camadas do objeto [04]. Na figura 01 é possível visualizar o sistema de Deposição Fundida da Manufatura Aditiva:

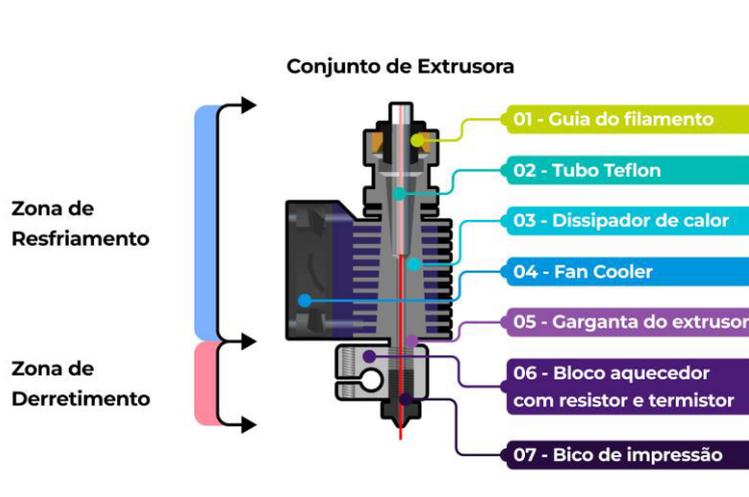


Figura 01: Sistema de Deposição Fundida (FDM) **Fonte:** Elaborado pelos autores.

Como qualquer outra tecnologia, a manufatura aditiva também possui pontos que precisam ser melhorados e limitações, um dos principais problemas que essa tecnologia traz é emissão de compostos orgânicos voláteis que trazem um agravamento na qualidade do ar onde a impressora se localiza, elevando assim riscos à saúde de quem trabalha no local [05]. Junto com a emissão dos compostos também existe a emissão de uma partícula ultrafina comparável aos objetos impressos 3D, sendo bastante associada a inflamações no sistema pulmonar aumento em morbidade e mortalidade. E a inalação de componentes orgânicos voláteis está relacionada a efeitos adversos, incluindo irritação no sistema respiratório, efeitos sensoriais e formação de câncer [06].

Contudo, além destes desafios relacionados à segurança do processo produtivo, conceitos ligados à sustentabilidade de maneira ampla como “fim de ciclo de vida”, “berço ao berço” e

“economia circular” podem ser discutidos dentro do contexto da impressão 3D. Assim, a partir da realização de uma pesquisa sistemática da literatura, o presente artigo tem como objetivo principal a construção de uma revisão sistemática da literatura relacionando a impressão 3D com conceitos de sustentabilidade, especialmente a circularidade, conseguindo assim destacar os principais avanços dessa relação. Na pesquisa foi escolhido o portal Science Direct para fazer a buscas de artigos dos últimos 5 anos sobre a relação entre os temas, levando em consideração a relevância do portal no meio acadêmico.

2. Contextualização da Manufatura Aditiva e seu impacto ambiental

O panorama atual reflete uma ampla integração da sustentabilidade em diversos processos da MA. A teoria do triplo resultado da sustentabilidade demonstra que o êxito empresarial é influenciado pela interação positiva entre economia, sustentabilidade ambiental e social [07], isso aprimora a lucratividade, atende às necessidades das partes envolvidas e preserva os recursos naturais [08].

No que diz respeito aos materiais mais utilizados na impressão 3D, encontra-se borracha, papel, resinas, metais e plástico, dependendo das particularidades do projeto definido [09]. Vale destacar que apesar de não ser tão popular, existem impressoras que usam a extrusão para imprimir artefatos de cerâmica e até mesmo alimentos [09]. A partir da Segunda Guerra Mundial houve um aumento na utilização de polímeros sintéticos, isso deve-se ao fato dos investimentos em pesquisa básica, principalmente para a indústria automobilística [03]. Neste contexto, os polímeros mais utilizados na impressão 3D, ainda são os sintéticos, que tiveram sua evolução na segunda metade do século XX, e que em sua maioria são derivados do petróleo, e que são de difícil degradação [10]. Geralmente, depois do descarte de peças de polímeros sintéticos ainda são necessários mais de 100 anos para a sua decomposição [03]. Para estes polímeros busca-se a implementação do reuso e da reciclagem, dentro de um ciclo tecnológico [11].

Por outro lado, as questões de fim de ciclo de vida colaboraram para a preocupação global com o uso de polímeros sintéticos, fomentando assim a pesquisa e o início da utilização de matérias biodegradáveis, dando destaque à decomposição [12], no sentido de implementar também o ciclo biológico. A Partir dos anos 2000 foi possível notar a tendência de demandas com materiais menos agressivos ao meio ambiente como por exemplo o plástico vegetal [13]. Sendo assim, se tornou possível o desenvolvimento de alguns tipos de polímeros ambientalmente amigáveis, entre eles os polímeros verdes, biopolímeros e polímeros biodegradáveis, que estão associados ao conceito de sustentabilidade [14].

Os polímeros biodegradáveis caracterizam-se pela sua degradação feita através de microrganismos, como fungos e bactérias [12]. No mercado encontram-se os polímeros biodegradáveis fabricados por materiais naturais como celulose, quitina, amido, entre outros; ou sintéticos como por exemplo o poli (álcool vinílico) (PVA) [15]. O polímero PVA ainda é considerado como um polímero completamente biodegradável [16]. Ainda no que diz respeito a polímeros, com baixo impacto ambiental, utilizados na impressão 3D, alguns ainda podem ser picados e reciclados e até mesmo biodegradados na natureza, e podem ser encontrados tanto em pó, em resina e em acrílico [17].

Neste cenário, há diferentes opções de polímeros para utilização na MA, e cabe aos projetistas e consumidores decisões importantes ao longo do ciclo de vida, especialmente no que diz

respeito ao consumo de recursos e à geração de resíduos. Para muitos especialistas, a Manufatura Avançada (MA) é amplamente reconhecida como uma abordagem ambientalmente amigável em comparação com os processos de fabricação clássicos. Essa tecnologia contrasta com os métodos de fabricação subtrativa e oferece suporte a uma diversificada gama de aplicações [18]. A Comissão Europeia, por meio do Digital Transformation Monitor de 2017, apresentou estatísticas reveladoras, ao investigar a natureza disruptiva da impressão 3D, previu-se que até 2050, essa tecnologia poderia potencialmente economizar até 90% da matéria-prima necessária para processos de fabricação convencionais.

3. Procedimentos Metodológicos

A revisão sistemática da literatura foi desenvolvida a partir de publicações já existentes, como livros, teses, artigos, entre outros [19]. Segundo Conforto [20], primeiro se estabeleceu o problema de pesquisa: “Pesquisar como artigos acadêmicos investigam o fim do ciclo de vida e a reutilização dos filamentos com sugestões menos agressivas para o meio ambiente?”

Em seguida definiu-se o portal Science Direct, para a seleção dos artigos, devido a sua relevância na comunidade científica. Foi então definida a string de busca, a qual envolve três áreas de estudo: i) Fim do ciclo de vida; ii) Manufatura Aditiva e iii) Filamentos. Após testes a string definida foi ((“3d print” OR “additive manufacturing” AND “filament”) AND (“end of life” OR “Circular economy”)), os operadores booleanos escolhidos foram, OR e AND, conseguindo assim uma melhor busca com as strings definidas, assim conseguindo melhores resultados para o estudo da manufatura aditiva juntamente com os filamentos e para estudar questões de fim do ciclo de vida dentro dos filamentos. A busca resultou em 588 artigos com os seguintes critérios de inclusão de artigos foram selecionados filtros: i) trabalhos de 2023 a 2019, últimos 5 anos; ii) Artigos revisados por pares e a artigos de pesquisa; iii) Artigos abertos, livre acesso. os quais após passarem pelos filtros de pesquisa restaram 159 artigos, estes passaram por um filtro de leitura dos títulos em que foram selecionados 13 artigos para leitura na íntegra.

Esses artigos foram avaliados para fazer a relação de resultados relacionados a: i) Manufatura Aditiva; ii) Economia Circular; iii) Final do ciclo de vida [20]. Inicialmente, os dados coletados durante a pesquisa realizada no Science Direct foram utilizados para a construção de quadros informativos. Este processo envolveu uma análise cuidadosa dos dados, com foco particular em artigos de revisão e pesquisa. O objetivo era compreender as tendências e padrões emergentes na literatura disponível a fim de fornecer uma visão abrangente do estado atual do campo. A seguir na tabela 01 é apresentado os dados dos arquivos selecionados.

Nome do Artigo	Autores e Ano	Periódicos
A Comparative Study on the Life Cycle Assessment of a 3D Printed: Product with PLA, ABS & PETG Materials	(Kumar, et al., 2022)	Procedia CIRP, v. 107, p. 15-20
Additive Manufacturing for Sustainability and Circular Economy: Needs, Challenges, and Opportunities for 3D Printing of Recycled Polymeric Waste	(Rashid; Koç, 2023)	Materials Today Sustainability, p. 100529
Additive manufacturing in cities: Closing circular resource loops	(Valera, et al., 2023)	Circular Economy, p. 100049
Life cycle assessment of additive manufacturing processes: A review	(Kokare; Oliveira; Godina, 2023)	Journal of Manufacturing Systems, v. 68, p. 536-559

Life cycle assessment of filament production in distributed plastic recycling via additive manufacturing	(Caceres-Mendoza, et al., 2023)	Cleaner Waste Systems, v. 5, p. 100100
Net zero on 3D printing filament recycling: A sustainable analysis	(Oladapo, et al., 2023)	Science of the Total Environment, p. 165046
Plastic recycling in additive manufacturing: A systematic literature review and opportunities for the circular economy	(Sanchez, et al., 2020)	Journal of Cleaner Production, v. 264, p. 121602
Summary and derived Risk Assessment of 3D printing emission studies	(Romanowski, et al., 2023)	Atmospheric Environment, v. 294, p. 119501
Sustainability of additive manufacturing: the circular economy of materials and environmental perspectives	(Colorado; Velásquez; Monteiro, 2020)	Journal of Materials Research and Technology, v. 9, n. 4, p. 8221-8234
Sustainability perspectives – a review of additive and subtractive manufacturing	(Jayawardane, et al., 2023)	Sustainable Manufacturing and Service Economics, p. 100015
Technology adoption, global value chains and sustainability: The case of additive manufacturing	(Sanguineti; Magnani; Zucchella, 2023)	Journal of Cleaner Production, v. 408, p. 137095
The potential of converting plastic waste to 3D printed products in Sub-Saharan Africa	(Oyinlola, et al., 2023)	Resources, Conservation & Recycling Advances, v. 17, p. 200129
Waste to wonder to explore possibilities with recycled materials in 3D printing	(Olawumi, et al., 2023)	Science of the Total Environment, v. 905, p. 167109

Tabela 01: Artigos Selecionados **Fonte:** Elaborado pelos Autores (2023)

4 Resultados e Discussões

Muitos estudos estão sendo conduzidos para dissertar sobre questões importantes da MA, como por exemplo, qualidade confiável e consistente, seleção abrangente de materiais, produtividade e eficiência aprimoradas. No entanto, é crucial destacar que a questão da sustentabilidade ainda permanece pouco explorada.

Desde 2015, quando o conceito de Economia Circular foi apresentado pela Fundação Ellen MacArthur houve um aumento notável no volume de estudos nestes campos, indicando um crescente interesse e reconhecimento da importância de tópicos relacionados à circularidade na comunidade científica. Esta pesquisa focou nos últimos 5 anos, quando o conceito já estava consolidado e o aumento mais nítido. Kumar [21] afirma que os resultados da comparação entre PETG, PLA e ABS mostraram que o PETG é o mais sustentável, seguido pelo PLA e, por fim, o ABS. Embora o PLA seja biodegradável, ele teve os maiores impactos negativos na depleção de água e ecotoxicidade de água doce [21]. Destaca-se a importância da reciclagem, especialmente para PLA e ABS, com a extração de matéria-prima para o PLA tendo o maior impacto negativo relacionado à água. Essas conclusões são essenciais para orientar a escolha de materiais na fabricação de produtos 3D, considerando não apenas suas propriedades técnicas, mas também seus efeitos ambientais durante todo o ciclo de vida.

Para Jayawardane [22], a avaliação do ciclo de vida (ACV) e o custo do ciclo de vida (CCV) são aspectos cruciais na determinação da sustentabilidade dos métodos de fabricação, como a fabricação aditiva e subtrativa. A ACV é uma metodologia que examina o impacto ambiental de um produto desde a extração de matérias-primas até o descarte final, permitindo identificar os impactos ambientais associados à produção de peças. Ao aplicar a ACV na fabricação, é

possível comparar o desempenho ambiental desses métodos, identificar pontos críticos de impacto e orientar decisões para melhorar a sustentabilidade.

Por outro lado, o CCV avalia os custos ao longo do ciclo de vida de um produto, incluindo produção, manutenção, uso e descarte. Isso proporciona uma compreensão abrangente dos custos envolvidos na produção de peças, desde os custos diretos de fabricação até os custos indiretos ao longo do ciclo de vida do produto. Integrando o CCV à avaliação da sustentabilidade da fabricação aditiva e subtrativa, é possível analisar não apenas os impactos ambientais, mas também os aspectos econômicos, oferecendo uma visão completa do desempenho sustentável. Assim, a combinação da ACV e do CCV possibilita uma abordagem holística para avaliar e melhorar a sustentabilidade dos métodos de fabricação, garantindo uma análise completa dos impactos ambientais e econômicos ao longo do ciclo de vida dos produtos fabricados pela manufatura aditiva.

Rashid [23] destaca a importância da reciclagem de polímeros na indústria, abordando a classificação de materiais e os desafios enfrentados nesse processo. São revisadas técnicas avançadas de reciclagem, explorando o uso de polímeros reciclados na manufatura aditiva. O estudo oferece insights sobre práticas sustentáveis e propõe direções para pesquisas futuras, visando melhorar a eficiência e sustentabilidade da reciclagem de polímeros. Também é apresentado um modelo de economia circular para a manufatura aditiva com polímeros reciclados, destacando seu potencial para promover a sustentabilidade na indústria.

O estudo de Oladapo [24], indica que o processo de reciclagem de filamentos de impressão 3D geralmente consome menos energia do que a produção de filamentos virgens. A reciclagem resulta em emissões de gases de efeito estufa mais baixas do que a produção de filamentos virgens. No entanto, para alcançar emissões líquidas zero, é necessário adotar fontes de energia renovável durante a reciclagem e reduzir as emissões relacionadas ao transporte. As principais recomendações do autor são: incluir a adoção de fontes de energia renovável, otimização da logística, incentivos políticos, conscientização do consumidor e investimento em pesquisa e desenvolvimento para melhorar o processo de reciclagem e a qualidade dos filamentos reciclados.

Oyinlola [25], enfatiza a necessidade de cooperação internacional para impulsionar a capacidade de produção e inovação na impressão, além disso seu estudo identificou que a qualidade do filamento usado tem um impacto direto na consistência e previsibilidade da resistência do filamento, especialmente em amostras de plásticos reciclados. Isso destaca a importância de assegurar a qualidade dos materiais empregados no processo de impressão 3D para alcançar resultados uniformes e de alta qualidade.

4 Considerações Finais:

O estudo realizado chegou a conclusão que questões relacionadas ao pós-processamento e final do ciclo de vida estão sempre sendo excluídas dos estudos. Outro ponto interessante foi que de modo geral a MA se mostrou uma solução mais amigável ao meio ambiente devido a menor quantidade de material utilizado e uma melhor utilização do material. Apenas em casos

específicos em que alguns materiais exigiam maiores temperaturas de processamento mostravam maior gasto energético e mais resíduos tóxicos sendo liberados, nesses casos a manufatura aditiva se mostrou mais danosa que a manufatura convencional.

Ao adotar essa abordagem sistêmica, criou-se um corpo de conhecimento substancial que orientará a integração da MA de forma sustentável nas operações industriais. Esse esforço de pesquisa ajudará as empresas a tomar decisões mais informadas, reduzir os riscos e maximizar os benefícios da MA, contribuindo para um futuro industrial mais eficiente e ecologicamente consciente.

É fundamental direcionar esforços para compreender e abordar a interseção entre a manufatura avançada e a sustentabilidade. Isso implica a busca por métodos inovadores que reduzam o impacto ambiental, a otimização do ciclo de vida dos produtos e a adoção de práticas sustentáveis em toda a cadeia de produção.

Referências

- [01]HULL, Charles W. inventor; UVP, Inc., assignee. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. United States patent US, v. 4, n. 575, p. 330, 1986.
- [02]SCHUBERT, C.; VAN LANGEVELD, M. C.; DONOSO, L. A.; Innovations in 3D printing:a 3D overview from optics to organs 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1136/bjophthalmol-2013-304446>.> Acesso em: 24/04/2024
- [03]GOMES, NEVES, J. et al. Impressão 3D para vestuário: novos paradigmas de design e consumo. *ModaPalavra e-periódico*, v. 13, n. 29, p. 136-156, 2020.
- [04]MIRANDA MORANDINI, M.; DEL VECHIO, G. H. Impressão 3D, Tipos E Possibilidades. *Revista Interface Tecnológica*, v. 17, n. 2, p. 67–77, 2020.
- [05]DAVIS, A. Y.; ZHANG, Q.; WONG, J. P. S.; et al. Characterization of volatile organic compound emissions from consumer level material extrusion 3D printers. *Building and Environment*, v. 160, n. March, p. 106209, 2019.
- [06]BYRLEY, P.; GEER WALLACE, M. A.; BOYES, W. K.; et al. Particle and volatile organic compound emissions from a 3D printer filament extruder. *Science of the Total Environment*, v. 736, p. 139604, 2020.
- [07]HARSTVEDT, J. D., Dunaway, D., Bian, L., & Jaradat, R. (2018). An exploratory investigation of Additively Manufactured Product life cycle sustainability assessment. *Journal of Cleaner Production*, 192, 55-70.
- [08]JANJUA, Shahana Y.; SARKER, Prabir K.; BISWAS, Wahidul K. Impact of service life on the environmental performance of buildings. *Buildings*, v. 9, n. 1, p. 9, 2019.
- [09]SILVA, D. N. DA. A tridimensionalidade da superfície vestível e a impressão 3d: processos, estratégias e experimentações. *Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação*, p. 173, 2020.

- [10]MALHERBI, N. M. Desenvolvimento de filmes biodegradáveis a base de polímeros de fontes renováveis e polpa de guabiroba (*Campomanesia xanthocarpa*). 2015.[s.l: s.n.].
- [11]MCDONOUGH, W. e M. Braungart. *Cradle to cradle: remaking the way we make things*. New York: North Point Press. 2002. 193 pg.
- [12]OZAKI, S. K. Compósitos Biodegradáveis de Resíduos de madeira-PVA modificado por anidrido fáltico. p. 210, 2004.
- [13]ABDULLAH, Z. W. et al. PVA, PVA Blends, and Their Nanocomposites for Biodegradable Packaging Application. *Polymer - Plastics Technology and Engineering*, v. 56, n. 12, p. 1307–1344, 201.
- [14]GOMES, NEVES, J. *Moda e Impressão 3D: Estado da arte, tecnologia, materiais e inovação*. 2015 [s.l: s.n.].
- [15]OLIVEIRA, C. B. DE. Influência do peso molecular do polímero na morfologia, interação e liberação de flavonoides em filmes de poli (álcool vinílico). 2018. [s.l: s.n.].
- [16]ARANHA, I. B.; LUCAS, E. F. Poli(Álcool Vinílico) Modificado com Cadeias Hidrocarbônicas: Avaliação do Balanço Hidrófilo/Lipófilo. *Polímeros*, v. 11, n. 4, p. 174–181, 2001.
- [17]DE LIMA, Patrícia Cristina; DUPONT, Mariana Gomes. A impressão 3D no mercado de moda: sustentabilidade e desenvolvimento. *Diálogo com a Economia Criativa*, v. 3,n. 8, p. 102-116, 2018.
- [18]BARROS, K. D. S. Identification of the environmental impacts contributors related to the use of Additive Manufacturing technologies, 2017. Tese de Doutorado. Université Grenoble Alpes. Disponível em: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01689798/> Acesso em: Jan 2024
- [19]GIL, A. *Como elaborar projetos de pesquisa*. Atlas: São Paulo, 2007.
- [20]CONFORTO, Edivandro Carlos; AMARAL, Daniel Capaldo; SILVA, SL da. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. *Trabalho apresentado*, v. 8, p. 1-12, 2011.
- [21] KUMAR, Rishi et al. A comparative study on the life cycle assessment of a 3D printed product with PLA, ABS & PETG materials. *Procedia CIRP*, v. 107, p. 15-20, 2022.
- [22]JAYAWARDANE, Heshan et al. Sustainability perspectives—a review of additive and subtractive manufacturing. *Sustainable Manufacturing and Service Economics*, p. 100015, 2023.
- [23] RASHID, Ans; KOÇ, Muammer. Additive manufacturing for sustainability and circular economy: needs, challenges, and opportunities for 3D printing of recycled polymeric waste. *Materials Today Sustainability*, p. 100529, 2023.
- [24]OLADAPO, Bankole I. et al. Net zero on 3D printing filament recycling: A sustainable analysis. *Science of the Total Environment*, p. 165046, 2023.
- [25] OYINLOLA, Muyiwa et al. The potential of converting plastic waste to 3D printed products in Sub-Saharan Africa. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, v. 17, p. 200129, 2023.

[26] CACERES-MENDOZA, Cristian et al. Life cycle assessment of filament production in distributed plastic recycling via additive manufacturing. *Cleaner Waste Systems*, v. 5, p. 100100, 2023.

[27] COLORADO, Henry A.; VELÁSQUEZ, Elkin I. Gutiérrez; MONTEIRO, Sergio Neves. Sustainability of additive manufacturing: the circular economy of materials and environmental perspectives. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 9, n. 4, p. 8221-8234, 2020.F

[28] FORD, S.; DESPEISSE, . Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 137, 2016. 1573-1587. DOI: HYPERLINK "<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.150>"

[29] KOKARE, S.; OLIVEIRA, J. P.; GODINA, R. Life cycle assessment of additive manufacturing processes: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 68, n. May, p. 536–559, 2023a.

[30] OLAWUMI, Matthew A. et al. Waste to wonder to explore possibilities with recycled materials in 3D printing. *Science of the Total Environment*, v. 905, p. 167109, 2023.

[31] ROMANOWSKI, Heike et al. Summary and derived risk assessment of 3D printing emission studies. *Atmospheric Environment*, v. 294, p. 119501, 2023.

[32] SANCHEZ, Fabio A. Cruz et al. Plastic recycling in additive manufacturing: A systematic literature review and opportunities for the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, v. 264, p. 121602, 2020.

[33] SANGUINETI, Francesca; MAGNANI, Giovanna; ZUCHELLA, Antonella. Technology adoption, global value chains and sustainability: The case of additive manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, v. 408, p. 137095, 2023.

[34] VALERA, Elias Hernandez et al. Additive manufacturing in cities: Closing circular resource loops. *Circular Economy*, p. 100049, 2023.

Utilização Da Fibra De Cânhamo (*Cannabis Sativa L.*) Como Matéria-Prima Na Construção Civil

*Use of Hemp Fiber (*Cannabis Sativa L.*) as a Raw Material in Civil Construction*

Luanna Lourenço Morais, Mestranda no Programa de Pós-Graduação Projeto e Cidade, Universidade Federal de Goiás

luanna_morais@discente.ufg.br

Fabiolla Xavier Rocha Ferreira Lima, Doutora em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Goiás

fabiolla_lima@ufg.br

Resumo

A preocupação ambiental impulsiona a busca por alternativas sustentáveis na construção, incluindo o uso de fibras naturais como o cânhamo. Este estudo examina seu potencial, baseando-se em revisão da literatura e estudo de caso. Da produção à transformação em matéria-prima, são analisados os aspectos da utilização de fibras naturais na construção civil. Conclui-se que o cânhamo é uma opção viável, mas ressalta-se a necessidade de aprimoramento das técnicas construtivas para sua eficácia e aceitação no mercado, visando torná-lo mais econômico e amplamente adotado.

Palavras-chave: Fibras naturais; Cânhamo; Sustentabilidade.

Abstract

Environmental concerns drive the search for sustainable alternatives in construction, including the use of natural fibers such as hemp. This study examines its potential, based on a literature review and case study. From production to transformation into raw materials, aspects of the use of natural fibers in civil construction are analyzed. It is concluded that hemp is a viable option, but the need to improve construction techniques for its effectiveness and market acceptance is highlighted, aiming to make it more economical and widely adopted.

Keywords: *Natural fibers; hemp; sustainability*

1. Introdução

A demanda por produtos e bens de consumo que utilizam fontes renováveis como matéria-prima está cada vez maior devido à preocupação com o meio ambiente. Na construção civil, a busca por alternativas que pensam na sustentabilidade tem se tornado de extrema necessidade, pois de acordo com Costa, Barros [1] é o maior setor da economia em termos de gestão e fluxo de matéria-prima, além de ser um dos segmentos mais responsáveis pela geração de resíduos e pela emissão de gases de efeito estufa na atmosfera.

Durante o processo projetual, optar por materiais que apresentam menor impacto ambiental durante sua extração, fabricação, aplicação e descarte é de grande importância para contribuir com a preservação dos recursos naturais, redução da poluição e minimização da degradação ambiental.

A utilização de fibras naturais como material de construção já é uma prática antiga, mas tem retornado ao mercado aliada a novas tecnologias, na tentativa de encontrar alternativas sustentáveis, eficientes e economicamente viáveis [2]. Nesse contexto, a fibra de cânhamo, extraído do caule da planta conhecida cientificamente como *Cannabis sativa L.*, volta a ser discutido.

Ao longo da história da humanidade, o cânhamo foi amplamente utilizado em aplicações industriais, abrangendo setores como têxteis, cordas, óleos e alimentos [02]. A ascensão da utilização de fibras sintéticas na indústria têxtil, além de campanhas massivas de marginalização de grupos étnicos, sobretudo após o século XX nos Estados Unidos, resultam em políticas proibicionistas que perseguiram o cultivo de qualquer espécie da planta *Cannabis sativa L.* [03]. Diante deste cenário, a produção da fibra foi interrompida por um longo período nos países afetados pela proibição, impossibilitando o avanço tecnológico sobre os diversos usos desta fibra.

De acordo com Araújo [04], há cerca de 8.500 anos, os chineses fizeram a primeira descoberta do cânhamo, que posteriormente se espalhou pela Ásia, Egito e Europa entre 1000 a 2000 a.C. O cultivo na Europa ganhou destaque a partir de 500 d.C., especialmente com os povos franceses, alemães e vikings, devido às suas aplicações que incluíam o uso em cordoaria, tecidos, fortalecimento de construções com terra crua ou argila, bem como métodos de impermeabilização baseados em óleos.

Entre os séculos XV e XVI, os portugueses e espanhóis levaram o cânhamo para as Américas do Sul e do Norte, principalmente para a produção de cordas e velas para embarcações. No entanto, nos séculos XVIII e XIX, o desenvolvimento das culturas de algodão, juntamente com a invenção de máquinas de desfibração e a introdução de fibras sintéticas, resultaram em um declínio da cultura do cânhamo [05].

Eires [04] diz que, em 1987, Charles Rasetti iniciou os primeiros estudos contemporâneos sobre a utilização da fibra de cânhamo na construção civil, com o objetivo de resgatar e modernizar as técnicas tradicionais. Atualmente, de acordo com Eires [4] a China e França são os principais países produtores desse material mundialmente, com foco principalmente na fabricação de papel e compósitos. No mercado atual, já se encontram empresas de materiais de construção que utilizam a fibra de cânhamo como matéria-prima. O “*hemcrete*”, termo que surge da união das palavras *hemp* (cânhamo) e *crete* (concreto), é um material de construção feito com base do cerne lenhoso encontrado no caule do cânhamo, que é triturado e misturado à cal e água para dar ligação. As aplicações deste material são múltiplas, a mais popular é o bloco pré-fabricado que tem formato que se assemelha a um

tijolo de concreto. A massa de *hemcrete* também pode ser aplicada em paredes através de um jato pulverizante em uma estrutura pré-fabricada ou por compactação a partir de moldes, formando uma parede monolítica. As lãs de cânhamo, extraídas da parte externa do caule, são utilizadas como isolantes térmicos e acústicos. No mercado também já se encontram placas feitas de resina e fibras de cânhamo trituradas, onde o produto final se assemelha a placas de madeira, podendo ser aplicadas em revestimentos de pisos e paredes.

À medida em que as potencialidades da fibra de cânhamo são apresentadas, surgem questionamentos sobre o motivo de sua presença limitada no mercado atual. Questões como o uso da fibra devido à discriminação e o estigma associados à planta *cannabis*, a sua viabilidade econômica, a versatilidade, sustentabilidade e seu desempenho de fato como um material aplicado na construção civil serão evidenciadas neste artigo, tendo como objetivo destacar as potencialidades do cânhamo industrial como agregado em materiais de construção, buscando por casos já desenvolvidos em construções e avaliações de desempenho realizadas em laboratório de materiais que utilizam essa matéria-prima, e a partir disso compreender as possibilidades da fibra de cânhamo como um material alternativo aplicado na construção civil.

O procedimento metodológico deste artigo foi feito a partir de busca na plataforma Google Acadêmico com as palavras-chave “cânhamo industrial” e “*hemcrete*”, filtrando pesquisas em português e ordenando por relevância. Foram elencadas as pesquisas mais citadas, que se mostraram importantes por trazer ensaios de desempenho e de avaliação do ciclo de vida (ACV) do concreto de cânhamo, buscando as potencialidades da sua utilização na construção civil. Diante dos ensaios e o entendimento do contexto histórico, político e social da utilização da *cannabis* e da fibra de cânhamo, serão evidenciados neste artigo através da revisão da literatura e um estudo de caso autores que dialogam com o tema, os conceitos trabalhados, algumas pesquisas e experimentos, e os resultados por eles encontrados.

2. Contextualização histórica

Os registros mais antigos da utilização do cânhamo datam entre 1000 e 2000 a.C na Ásia, onde era empregado na confecção de cordas e papel. Por volta de 207 a.C, surgiram as primeiras aplicações têxteis, com ênfase nas culturas chinesa e indiana [05]. Ao longo do tempo, a planta se difundiu pelo continente africano e, somente por volta de 500 d.C, o cânhamo começou a ser adotado na Europa. Foi usado para fabricar cordas, papel e reforçar construções de argila, além de servir como material impermeabilizante. Foi na França que surgiram as primeiras construções feitas com base em cânhamo, terra e cal.

Desde o período das grandes navegações até a Revolução Industrial, a fibra de cânhamo foi um recurso de grande importância para a humanidade. Entre 1500 e 1600 d.C, foi introduzida na América pelos exploradores portugueses e espanhóis, que a utilizavam na confecção de cordoaria e velas para suas embarcações. Já no período de industrial, a fibra de cânhamo era matéria-prima têxtil e de papel, principalmente nas regiões onde se encontra o Reino Unido, Itália, França, Holanda, Alemanha e Espanha [06].

O cânhamo chegou ao Brasil por volta do século XVIII, trazido pela coroa portuguesa, com o objetivo de produzir novos tecidos e continuar a fabricação de velas e cordoaria, que já ocorria em Portugal. De acordo com Da Rosa [06] entre 1747 e 1824, a Coroa portuguesa

fez várias tentativas de cultivar o cânhamo em diferentes regiões do território, como Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Pernambuco. Em 1830, o uso da cannabis no Brasil passa a sofrer resistências. Neste mesmo ano, a Câmara Municipal do Rio de Janeiro aprovou a primeira lei proibicionista do mundo, conhecida por penalizar o “Pito do Pango” com a justificativa de que pessoas escravizadas se revoltavam a partir do seu uso [07]. A lei era utilizada como forma de controlar e punir costumes de imigrantes africanos em situação de escravidão. De acordo com Saad [08], o médico José Rodrigues da Costa Dória realizou a primeira análise sobre a cannabis intitulada “Os fumadores de maconha: efeitos e males do vício”, fortalecendo discriminações contra essa população. No final do século XIX e início do século XX surgiram empreendimentos comerciais com apoio dos governos dos estados de Pernambuco e Rio de Janeiro, focados na produção de fibras para papel e tecidos, especialmente para embalagens de café, arroz e outros produtos. A proibição em nível federal ocorre em 1932 durante a Era Vargas, por meio da Lei de Fiscalização de Entorpecentes [08]. Neste cenário, a utilização da fibra de cânhamo, matéria-prima retirada de uma das espécies da planta cannabis, ficou totalmente afetada em todo território brasileiro.

3. Aplicações na construção civil

O cânhamo utilizado para fins industriais é uma variedade da planta *Cannabis sativa L.* que muitas vezes é confundido com a maconha, planta da mesma espécie, mas de diferente variedade e uso, como traz Santos [09]. O cânhamo é geneticamente distinto devido à sua composição química, possuindo um índice praticamente nulo de substâncias psicoativas, tendo geralmente menos de 0,1% de *thetracannabiol* (THC), enquanto que a maconha tem um índice de THC bem mais elevado, variando entre 4 a 12% [10].

O cânhamo e a maconha apresentam diferenças não apenas em relação ao teor de THC, mas também quanto à sua estrutura, enquanto o cânhamo pode crescer até 4 metros de altura, a maconha geralmente atinge apenas 2 metros. As folhas variam em tamanho, forma e espessura, e as flores, onde se concentram o THC, são maiores na maconha e menores no cânhamo. De acordo com Klitzke [02], o cânhamo leva cerca de 120 dias para amadurecer, com o momento ideal de plantio na primavera, de março a junho no hemisfério norte e de setembro a dezembro no hemisfério sul. Além disso, o cânhamo é resistente a pragas e pode ser cultivado com mínima ou nenhuma necessidade de agrotóxicos. Também possui a capacidade de regenerar o solo e é utilizado em rotação de culturas e na recuperação de solos degradados através da nitrogenação [11].

De acordo com Peev [12] o caule do cânhamo possui propriedades vantajosas, incluindo resistência, isolamento, capacidade de transpiração e leveza, além de ser composto por fibras longas que são difíceis de quebrar. O núcleo lenhoso do caule, conhecido como "cerne lenhoso" é parte utilizada para a fabricação do *hempcrete*, por exemplo. Essa parte da planta pode ser triturada em diferentes granulometrias e, após esse processo, assemelha-se a pequenos fragmentos de madeira, mas distinguem-se pela sua extrema leveza e capacidade de absorção [05]. As fibras consistem em pequenos paralelepípedos com dimensões que variam de 5 a 30 mm, o que explica a semelhança aparente com aparas de madeira. O cânhamo apresenta uma densidade média de 110 a 150 kg/m³, o que lhe confere uma notável leveza, tornando-o um recurso valioso quando utilizado como agregado em materiais construtivos. Sua composição química é predominantemente composta por óxido de cálcio

(CaO, 44.057%), sílica (SiO₂, 24.649%), óxidos de potássio e sódio (K₂O e Na₂O, com 12.113% e 9.783%, respectivamente) [13].

Além do núcleo lenhoso, de acordo com Santos [09], as fibras retiradas da parte externa do caule, conhecidas como lã de cânhamo, podem ser utilizadas como isolante térmico e acústico em construções. As fibras são aglomeradas e levemente comprimidas, formando placas flexíveis que são aplicadas em pisos, paredes e coberturas [14]. Embora o preço seja mais elevado em comparação com a lã mineral, por exemplo, o cânhamo traz benefícios ambientais e para a saúde, pode ser reciclado, melhora a qualidade do ar interior e possui uma menor energia incorporada em comparação com outros materiais isolantes, como a lã de rocha [15].

4. Pesquisas e experimentos

A avaliação de desempenho em materiais de construção é uma forma de garantir a qualidade e a segurança de estruturas e componentes utilizados. São uma parte essencial do processo para que estes materiais atendam aos requisitos técnicos necessários para assegurar a integridade das estruturas e suas possibilidades de aplicações, além de conferir suas qualidades térmicas e acústicas.

Araújo [04] busca analisar o desempenho de composições do concreto de cânhamo, considerando sua aplicação em elementos não-estruturais da construção. A autora propõe criar dosagens para fabricação de blocos e placas leves utilizando cânhamo industrial e conduzir testes com combinações de diferentes traços e tempos de cura, a fim de compreender os fatores que afetam o comportamento mecânico das misturas, avaliar seu desempenho e, assim, auxiliar na seleção adequada das diferentes composições para usos específicos.

Para o teste de resistência à compressão foram confeccionados três corpos de prova para cada tempo de cura: sete, quatorze, trinta e noventa dias, com o objetivo de garantir uma média de valores, aumentando a confiabilidade dos dados obtidos. A mistura utilizada para fabricação dos corpos de prova contém 65% de cal hidratada, 30% de cânhamo, água, relação água e ligante igual a 1 e 1% de borato de sódio conhecido como bórax, um aditivo mineral usado por conter propriedades antissépticas, antifúngicas, antivirais e antibacterianas. A pré-carga utilizada pela máquina foi de 250N, com uma velocidade de 25N/s. Ao analisar o comportamento do material, especialmente sua ductilidade, e considerando o método relativamente simples de compactação utilizado nos ensaios, os testes possibilitaram observar que o material apresenta uma maior resistência à compressão, quanto maior percentagem tiver de ligante do que agregado, contudo se esta for em excesso, a sua resistência decresce. É possível verificar que é necessária a continuação de estudos para que o material seja viável para futuros usos no setor da construção.

Quanto ao ensaio de condutividade térmica, que se refere à capacidade dos materiais de conduzirem energia térmica, a autora utilizou uma placa com medida de 15x15cm com cura de noventa dias e a submeteu a cinco testes em alambeta, um aparelho que permite obter uma avaliação objetiva da sensação quente/frio, com o fim de obter uma média de valores que assegurem a confiabilidade dos resultados alcançados. Os ensaios demonstraram valores baixos de condutividade térmica ao comparar com materiais como borracha ou o linóleo, embora ligeiramente superiores a alguns materiais comumente utilizados na construção como a lã de rocha ou a lã de vidro.

A absorção de água por imersão também foi avaliada pela autora, definida pela variação de massa do corpo de prova endurecido quando imerso em água e comparada à massa do mesmo corpo de prova quando seco, sendo expressa em relação ao seu volume. Para conduzir este teste foram produzidos três corpos de prova compostos da mesma mistura, submetidos a um período de cura de noventa dias. Os resultados confirmam uma porosidade significativa nesse material, evidenciada não apenas pela porcentagem de absorção de água, mas também pelo considerável número de pesagens necessárias na segunda fase do teste para alcançar a estabilidade dos valores. Além disso, destaca-se o fato de os corpos de prova flutuarem ao serem submersos em água. Apesar da alta absorção de água, os corpos de prova se mantiveram intactos após saturação. Em resumo, a alta absorção mostra limitações em certas aplicações na construção civil, problema que pode ser contornado através da incorporação de um hidrofugante de superfície após alguns dias de cura. Esses agentes impermeabilizantes retêm a água, impedindo sua penetração, reduzindo a porosidade do material e isolando-o da umidade ambiental.

Também já existem pesquisas a respeito da avaliação do ciclo de vida (ACV) do concreto de cânhamo que, de acordo com Oliveira e Pinto [16] é uma metodologia de análise baseada na ISO 14040, que leva em consideração os elementos ambientais e os possíveis efeitos favoráveis e desfavoráveis ao longo do ciclo de vida de um produto ou serviço, desde a obtenção da matéria-prima até sua disposição final. Em 2006, Oliveira e Pinto [16] afirmam que o governo francês financiou um estudo denominado de *Etude des Caracteristiques Environnementales du Chanvre par l'Analyse de son Cycle de Vie* (em livre tradução: Estudo de Características Ambientais do Cânhamo através da Análise do seu Ciclo de Vida) em que foi executada uma parede de concreto leve de cânhamo com estrutura de madeira. Tal estudo apresentou diversas conclusões, tais como a falta de necessidade de pesticidas ou de fertilizantes no cultivo do cânhamo; a cultura do cânhamo pode ser benéfica para o solo e para certos tipos de plantações; apresenta baixa energia incorporada no processo de produção e beneficiamento; o material pode ser utilizado como isolante térmico, inclusive substituindo materiais de origem fóssil ao trazer vantagens em termos energéticos e de emissões de gases tóxicos; e ainda que, o cânhamo, por ser uma planta de rápido crescimento, captura CO₂ e libera O₂, mantendo o carbono “sequestrado” durante sua vida útil.

4.1. Estudo de caso: Salão de esportes Pierre Chevet - Croissy Beaubourg, França

Em busca de experimentar uma abordagem inovadora e sustentável na sua implementação, o estúdio francês Lemoal Lemoal utilizou blocos pré-moldados de *hempcrete* na construção do Pierre Chevet, um pavilhão esportivo de 380m² localizado na cidade de Croissy Beaubourg, Île-de-France, França. De acordo com a The New School [17] esse é o primeiro edifício público construído com blocos de cânhamo produzidos no país, com o objetivo de diminuir a emissão de gases durante o processo de construção, contribuir com a economia local, além de ter se tornado uma oportunidade de encorajamento a outros profissionais da área pela utilização do material em projetos futuros.

Os arquitetos afirmaram, em entrevista para Parkes [18], que a estrutura é composta por uma mistura de blocos de madeira e concreto de cânhamo, pórticos de madeira semi-abobadados apoiados em uma parede de blocos de concreto de cânhamo como suporte. Os blocos são intertravados, dispensando o uso de argamassa ou adesivos. Foram produzidos por uma fábrica de cimento da região e o cânhamo utilizado como matéria-prima, colhido e

tratado a menos de 500km do local da obra. The New School [17] salienta que, para facilitar a manutenção, as fachadas foram revestidas por painéis de fibrocimento, que podem ser substituídos individualmente, o que pode ser observado na Figura 1. Seções inferiores das superfícies internas foram tratadas com gesso de cânhamo com o objetivo de ocultar a textura dos blocos. Na parte superior da área interna, Figura 2, os blocos de cânhamo foram deixados expostos, mantendo assim a suas qualidades acústicas e térmicas.

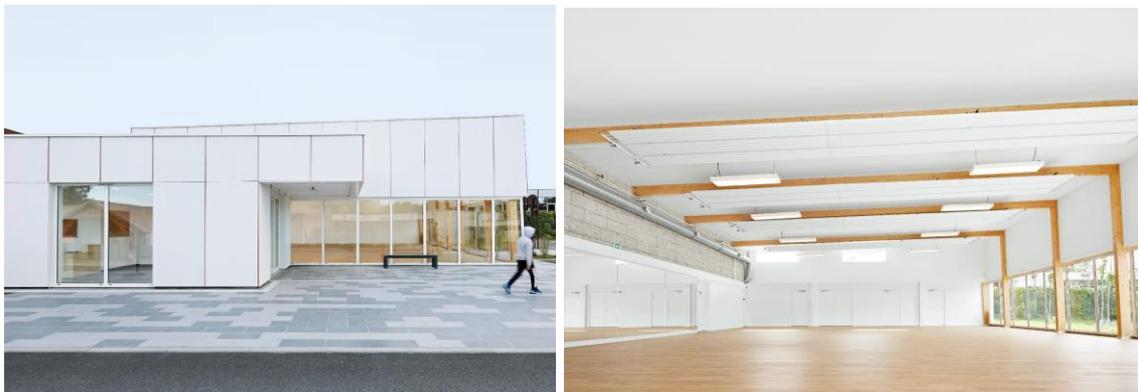


Figura 1: Fachada e **Figura 2:** Salão de esportes. Fonte: The New School [16]

Trabalhar com o concreto de cânhamo, para os profissionais, de acordo com Parkes [18], foi uma opção pois este material demonstra múltiplas performances acústicas e térmicas, além de permitir a redução da espessura das paredes, obtendo espaços interiores amplos e de elevada qualidade. Outra característica que chamou a atenção dos projetistas foi a resistência ao fogo. De acordo com a classificação europeia os painéis de concreto de cânhamo têm resistência REI 30, o que significa que este material, ao pegar fogo, garante estabilidade, integridade e isolamento durante 30 minutos. A produção da fibra de cânhamo é, geralmente, carbono negativa, o que significa que absorve mais carbono da atmosfera do que emite durante a colheita, processamento e transporte [19]. O pesquisador da Universidade de Cambridge, Darshil Shah afirma que o cânhamo industrial é muito eficiente no sequestro de carbono, podendo absorver entre oito a 15 toneladas de CO₂ por hectare de cultivo [18].

Projetos como este se tornam um laboratório de novas experiências e servem como referência de possibilidades de aplicação do *hempcrete*. É de se notar que os projetistas precisam se atentar às características do material, além das qualidades térmicas e acústicas. Porém, é importante pensar na relação custo-benefício comparado a outros materiais convencionais de construção pois, por ser um material novo no mercado, apresenta ainda pouca demanda, o que o torna pouco atraente para a produção em larga escala e, conseqüentemente, pouco acessível.

5. Desafios e considerações

Dado que a indústria da construção desempenha um papel significativo na degradação ambiental, tanto em termos de emissões de poluentes quanto de consumo de recursos naturais, surge a necessidade premente de adotar novas técnicas construtivas. Muitas dessas soluções incluem o uso de materiais ecológicos com menor consumo de energia, menor pegada de carbono, menor geração de resíduos, desempenho acústico aprimorado e outras propriedades que, de maneira sustentável, buscam equiparar ou superar os materiais tradicionais.

Nesse contexto, o uso do cânhamo na construção surge como uma alternativa aos materiais convencionais. Este artigo teve como objetivo central destacar as potencialidades do cânhamo industrial como agregado em materiais de construção, inspirada por casos já desenvolvidos em construções e avaliações de desempenho realizadas em laboratório de materiais que utilizam essa matéria-prima.

A partir da análise dos estudos apresentados, foram observadas vantagens e desvantagens na utilização da fibra de cânhamo como um potencial material a ser empregado na construção, seja em blocos não-estruturais, argamassas ou revestimentos.

Benefícios relacionados a ser uma matéria-prima renovável, apresentar baixas emissões de CO₂, baixa energia incorporada no processo de fabricação, ser reciclável e apresentar uma boa inércia térmica, conferem ao material características positivas para o meio ambiente, podendo ser comprovadas através da ACV realizada pelo governo francês. O concreto de cânhamo também pode colaborar para a criação de uma estrutura leve e fácil de manusear.

Sobre as desvantagens, por ser um produto ainda de difícil acesso devido às leis proibicionistas, torna-se um material de alto custo. Os ensaios para avaliação de desempenho do concreto de cânhamo ainda mostram problemas, como a baixa resistência mecânica, podendo ser utilizado apenas para fins não-estruturais. Quanto à condutividade térmica, observa-se que a composição exibe valores baixos, indicando um desempenho térmico favorável, embora ligeiramente superior a alguns materiais mais comuns na construção civil. A respeito das questões relacionadas à absorção de água, o material mostrou uma alta porosidade, no entanto, este problema pode ser facilmente superado ao aplicar um hidrofugante de superfície alguns dias após o processo de cura.

6. Conclusão

Diante das discussões e dados apresentados, é possível reconhecer o cânhamo industrial é um material que demonstra potencial para ser integrado no mercado da construção, sendo necessárias mais pesquisas e desenvolvimento de tecnologias para seu maior desempenho. O uso dessa fibra como material alternativo depende da alteração de leis que ainda existem em alguns países sobre produtos derivados da *Cannabis sativa L.*, escolhas da indústria da construção e de políticas públicas que, de fato, busquem soluções sustentáveis e invistam em inovações tecnológicas para contribuir com o avanço do uso da fibra de cânhamo. A busca por melhorias na eficiência das técnicas de construção com cânhamo é um aspecto essencial para garantir confiabilidade nos materiais que utilizam dessa matéria-prima.

Referências

[1] SOUZA, R. B.; COSTA, L.. A Utilização de novas tecnologias para otimizar a construção civil. Boletim do Gerenciamento, v. 34, n. 34, p. 38-48, 2023.

[2] KLITZKE, J. Mercado de Cânhamo: um estudo acerca do potencial mercadológico alinhado ao desenvolvimento sustentável para aplicações de fibra de cânhamo industrial. Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.

- [3] MARTINS, F. O Papel do Cânhamo Industrial numa Economia Circular. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Economia da Universidade do Porto, 2022.
- [4] ARAÚJO, E. F. Materiais Compósitos com incorporação de cânhamo industrial. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, 2015.
- [5] EIRES, R. M. G. Materiais Não Convencionais para uma Construção Sustentável Utilizando Cânhamo, Pasta de Papel e Cortiça. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, 2006.
- [6] DA ROSA, L. Cultivo do cânhamo no Brasil. In: 7ª Conferência Internacional de História Econômica & IX Encontro de Pós-Graduação em História Econômica, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Lilian-Da-Rosa/publication/330880922_Cultivo_do_canhamo_no_Brasil/links/5c598307a6fdccb608a9741e/Cultivo-do-canhamo-no-Brasil.pdf. Acesso em: 24 de mar. 2024.
- [7] DA COSTA NETTO, E. S. A Criminalização Da Maconha No Brasil: Raízes Históricas E Consequências Sociais. In: 2º Encontro Internacional Histórias & Parcerias, 2019. Disponível em: https://www.historiaeparcerias2019.rj.anpuh.org/resources/anais/11/hep2019/1569004900_ARQUIVO_d49fd9fe36f977ed192dd76698e7dff1.pdf. Acesso em: 24 de mar. 2024.
- [8] SAAD, L. G. "Fumo de negro": a criminalização da maconha no Brasil (c. 1890-1932). Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, 2013.
- [9] SANTOS, M. O. O Cânhamo como material de construção: Viabilidade e Oportunidade. Dissertação de Mestrado. Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Fernando Pessoa, 2013.
- [10] ROMÃO, C. Estudo do Comportamento Mecânico de Materiais Compósitos de Matriz Polimérica Reforçados com Fibras Naturais. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.
- [11] SCHLUTTENHOFER, C.; YUAN, L. *Challenges towards revitalizing hemp: A multifaceted crop. Trends in plant science*, v. 22, n. 11, p. 917-929, 2017.
- [12] PEEV, P. I. *Is industrial hemp a sustainable construction material? VIA University College, Horsens, Denmark*, 2012.
- [13] EIRES, R. JALALI, S., CAMÕES, A. Novos compósitos ecoeficientes para aplicações não-estruturais na construção. *Revista Internacional Construlink*, v. 8, n. 23, p. 45-55, 2010.
- [14] SOUSA, F. A. F. Otimização de métodos de escolha de materiais com base no desempenho sustentável. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.
- [15] KYMÄLÄINEN, H., SJÖBERG, A. *Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations. Building and environment*, v. 43, n. 7, p. 1261-1269, 2008.

[16] OLIVEIRA, C.; REAES PINTO, A. Características de sustentabilidade de materiais de construção renováveis. *Revista Arquitectura Lusíada*, N. 3 (2.º semestre 2011): p. 63-75. ISSN 1647-9009. 2011

[17] *THE NEW SCHOOL. Parsons School Of Design. Designing With Hemp+Lime. Open Source Detailing For Architects And Designers*. New York, 2022.

[18] PARKES, James. *Lemoal Lemoal completes first public building in France to be made from hempcrete*. *Dezeen*, 2021. Disponível em:
<https://www.dezeen.com/2021/08/01/hempcrete-pierre-chevet-sports-hall-lemoal-lemoal/>
Acesso em: 24 de mar. 2024.

[19] SANTOS, L. RISCALA, M. E. (Ed.) e CARDOSO, T. (Ed.). *Kaya Mind. Cânhamo no Brasil. Os possíveis impactos econômicos e sociais de um insumo sustentável em um país com grande capacidade agrícola*. 2022. Disponível em:
<https://kayamind.com/relatorio-canhamo-no-brasil/>. Acesso em: 28 mar. 2024.

Horta em um centro de ensino fundamental: Sistema de irrigação por microgotejamento automatizado

Vegetable garden at an elementary school: Automated micro-irrigation system

Luca Demartini Gontijo, graduando de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília

Lucagontijo911@gmail.com

Guilherme Carvalho de Oliveira Martins, graduando de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília

guilhermecarvalhoz@gmail.com

Dianne Magalhães Viana, Dra. Engenharia Civil, Universidade de Brasília.

diannemv@unb.br

Rafael Amaral Shayani, Dr. Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília

shayani@unb.br

Resumo

O artigo apresenta um estudo sobre a implementação de um sistema automatizado de irrigação de micro gotejamento em uma horta escolar, visando integrar conceitos de sustentabilidade e educação prática. Realizado por estudantes de engenharia utilizando o método de aprendizagem baseada em problemas, o projeto visou otimizar o uso da água e promover a educação ambiental. Os procedimentos metodológicos para solução do problema incluíram visitas de campo, dimensionamento do sistema, e elaboração de propostas de automatização com materiais específicos. Resultados mostraram a viabilidade do sistema para economia de água e como uma ferramenta educacional, sugerindo possibilidades de melhorias futuras e aplicação prática em contextos educacionais.

Palavras-chave: Educação para sustentabilidade; Irrigação automatizada; Horta escolar; Aprendizagem baseada em problemas.

Abstract

The article presents a study on the implementation of an automated micro-drip irrigation system in a school garden, aiming to integrate concepts of sustainability and practical education. Conducted by engineering students through problem-based learning methods, the project aimed to optimize water use and promote environmental education. Methodological procedures to solve the problem included field visits, system sizing, and development of automation proposals with specific materials. Results demonstrated the system's feasibility for water saving and as an educational tool, suggesting possibilities for future improvements and practical application in educational contexts.

Keywords: Education for sustainability; Automated irrigation; School vegetable garden; Problem-based learning.

1. Introdução

Nos últimos anos, a conscientização sobre os desafios globais e a necessidade de atingir os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas tem incentivado diversas áreas do conhecimento a buscar soluções inovadoras e sustentáveis. Neste contexto, a educação surge como um pilar fundamental para um desenvolvimento mais sustentável, conforme destacado pela UNESCO, enfatizando a importância de integrar princípios de sustentabilidade nos currículos educacionais [1-3].

A Educação para o Desenvolvimento Sustentável (EDS) representa uma abordagem global, holística e transformadora, endossada pela UNESCO [4]. Seu principal objetivo é equipar os estudantes com o conhecimento, habilidades, valores e atitudes essenciais para tomar decisões informadas e realizar ações responsáveis que favoreçam a preservação do meio ambiente, a sustentabilidade econômica e a construção de uma sociedade mais equitativa.

Contudo, a implementação da EDS nas instituições de ensino superior, muitas vezes, não atinge seu potencial pleno ao não adotar uma perspectiva abrangente e transformadora. Isso ocorre devido à falta de pedagogias inovadoras que estimulem uma participação mais ativa dos estudantes. Para superar essas limitações e promover um entendimento maior sobre sustentabilidade, é fundamental que a EDS integre estratégias didáticas que incentivem o pensamento crítico, a capacidade de resolver problemas de maneira criativa e o engajamento ativo dos alunos.

As Diretrizes Curriculares Nacionais (DCNs) das engenharias podem contemplar essa necessidade, incorporando a sustentabilidade como um tema transversal e abrindo a possibilidade de se adequar os projetos pedagógicos e os currículos à formação por competências tendo em vista o perfil do egresso [5].

Na Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília uma forma de implementar ações formativas com base na solução de problemas reais consiste em aliar demandas da extensão à disciplina Projeto Integrador utilizando o método de aprendizagem baseada em problemas (PBL).

Nesse sentido, este artigo é resultado do trabalho colaborativo entre uma equipe de cinco estudantes dos cursos de engenharia mecânica e mecatrônica da disciplina optativa Projeto Integrador e três estudantes de engenharia elétrica e de produção, do projeto de extensão “Tecnologias para o Avanço da Humanidade”, realizado durante o segundo semestre de 2023.

O objetivo do presente estudo consiste em apresentar a solução de um problema prático e relevante: a necessidade de melhorar um sistema de irrigação de uma horta e, com isso discutir os possíveis ganhos de aprendizagem das partes envolvidas. Esse problema trata-se de uma demanda de uma escola de ensino fundamental levantada pelo polo de extensão da Universidade de Brasília no Recanto das Emas e também se alinha aos princípios de sustentabilidade e educação prática tanto para os estudantes de engenharia quanto para os estudantes da escola.

Para solução do problema foi escolhido um sistema de micro gotejamento automatizado, pela capacidade desse sistema otimizar o uso da água, reduzir desperdícios e melhorar a eficiência da produção vegetal, aspectos críticos em um contexto de mudanças climáticas e escassez de recursos. A implementação de sistemas como este em um ambiente educacional oferece uma oportunidade única de integrar conceitos teóricos com práticas sustentáveis, promovendo uma educação holística e preparando os alunos para enfrentarem os desafios do século XXI com criatividade e responsabilidade [6-8].

2. Procedimentos Metodológicos

A abordagem utilizada para a solução do problema é a Aprendizagem Baseada em Problemas (ABP ou PBL) é um método de aprendizagem ativa que envolve os estudantes na exploração de problemas reais, complexos e multifacetados. Essa abordagem facilita uma compreensão mais profunda do objeto de estudo, mas também incentiva os estudantes a desenvolverem habilidades de pensamento crítico, resolução de problemas e a capacidade de aplicar conhecimento em situações práticas da vida real [9-11]

A estratégia foi utilizada consiste nos seguintes passos [12]: 1. Apresentação do problema aos participantes; 2. Discussão das ideias em grupo, usando o conhecimento prévio para tentar entender e abordar o problema; 3. Identificação de lacunas e questões mal compreendidas; 4. Planejamento da distribuição de tarefas objetivando investigar as questões mais profundamente; 5. Pesquisa e estudo individual, para resolver as questões levantadas; 6. Integração e síntese, compartilhar com o grupo, integrando os conhecimentos adquiridos ao contexto do problema; 7. Apresentação dos resultados, autoavaliação, avaliação pelos pares e reflexão sobre o processo vivenciado.

Durante a fase inicial de apresentação do problema foi realizada uma visita de campo para coletar dados preliminares essenciais à compreensão do problema. Para a organização das ideias, utilizou-se a ferramenta Canvas, facilitando a estruturação do pensamento coletivo. As fases de planejamento de tarefas, estudo individual e compartilhamento de informações foram repetidas em ciclos iterativos até que se alcançasse a solução desejada para o problema. A culminação deste processo foi a apresentação dos resultados finais na instituição escolar, marcando a conclusão bem-sucedida do projeto.

A seguir são apresentados detalhes do levantamento de dados e requisitos, do dimensionamento do sistema de irrigação e da automatização do sistema.

2.1. Visita de campo

A primeira parte do trabalho consistiu em ir ao local da horta educacional e fazer levantamento do tipo de irrigação utilizado, plantas cultivadas, área de plantio, tipo de solo e pontos de fornecimento de água. Para tal, utilizou-se uma trena de 10 m de comprimento para fazer as medições necessárias; um caderno e uma caneta para anotar e fazer o esboço da horta; um recipiente para captar água e um cronômetro para calcular a vazão de água disponível (Figura 1).



Figura 1: Visão geral da horta e medição dos limites dos canteiros. Fonte: autores.

2.2. Dimensionamento do sistema de irrigação

O sistema foi dimensionado considerando as alternativas disponíveis [13] (micro gotejamento ou aspersão), evapotranspiração de referência, tipo de solo, coeficiente de cultura, vazão máxima disponível e velocidade de corrente na linha principal. As etapas de dimensionamento foram definidas a partir de estudos na área [14] e realizadas com o auxílio de programação usando *Python*:

- i. Definição das variáveis e dados de entrada, como a área, a cultura, o espaçamento, a evapotranspiração máxima média no ano (E_{to}), o fator de cultura (K_c), a frequência de irrigação, o tipo de emissor, a vazão do emissor e seu espaçamento;
- ii. Cálculo da área de cada canteiro, a área total de plantio, a quantidade de linhas de gotejamento por canteiro, a metragem de linha de gotejamento por canteiro, o número de gotejadores por canteiro e a vazão por canteiro;
- iii. Cálculo da lâmina líquida de irrigação (h) usando o E_{to} , o K_c e um fator de ajuste de aplicação da irrigação (K_r), e a lâmina bruta de irrigação (h_b) a partir da razão entre a lâmina líquida e a eficiência de aplicação do emissor;
- iv. Cálculo do tempo de irrigação, do volume bruto por planta e da porcentagem da área molhada;
- v. Cálculo do diâmetro da linha principal, da linha de derivação e da linha lateral, considerando a vazão, a velocidade, a perda de carga e os diâmetros comerciais disponíveis;
- vi. Cálculo da pressão na saída do cabeçal de controle, somando as perdas de carga e a pressão de serviço;
- vii. Seleção do material que atende aos requisitos do projeto.

2.3. Automatização

A concepção da automatização foi planejada para permitir flexibilidade em modificações futuras e potencializar seu uso como recurso didático. Ela envolve um sistema centralizado composto por microcontroladores e válvulas solenoides, encarregados de gerenciar a distribuição da irrigação pelos diversos canteiros. Estes, por sua vez, serão equipados com sensores capacitivos de umidade, que permitirão o acionamento automático da irrigação por meio dos microcontroladores, assegurando uma gestão eficiente do recurso hídrico conforme a necessidade específica de cada área plantada. O projeto do sistema foi elaborado utilizando a ferramenta AutoCAD de acordo com as seguintes etapas:

- i. Definição dos requisitos de segurança;
- ii. Definição dos requisitos de manejo da irrigação (personalizada para cada canteiro ou geral);
- iii. Definição do tipo de controlador a ser utilizado;
- iv. Definição das válvulas a serem utilizadas;
- v. Definição do sensoramento do solo;
- vi. Elaboração do esquemático completo;
- vii. Seleção do material que atende aos requisitos do projeto.

3. Resultados

Os dados levantados na visita à horta foram condensados na Tabela 1.

Tabela 1: Levantamento de dados na visita à horta

Dado	Descrição
Tipo de irrigação utilizado	Fitas de irrigação e aspersão comum
Plantas cultivadas	Alface, tomate, rúcula, couve, coentro, couve, cebolinha, manjericão, boldo, alecrim, cenoura
Quantidade de canteiros aptos à plantio	Seis (6)
Área de plantio total	46,7m ²
Tipo de solo	Misto entre argiloso e arenoso
Ponto de fornecimento de água	Saída comum para mangueiras de jardim
Vazão disponível	3,75 * 10 ⁻⁴ m ³ /s

Fonte: autores.

Após a visita ao local, elaborou-se um desenho esquemático (ver Figura 2) que propõe um sistema de irrigação com micros gotejadores dispostos a intervalos regulares de 0,25 metros. Esse arranjo foi concebido para atender a uma diversidade de plantas, garantindo uma cobertura eficaz da área irrigada. Destaca-se que esse espaçamento entre as linhas de irrigação é flexível e pode ser ajustado conforme as exigências específicas de cada tipo de planta ou as condições do solo, possibilitando uma personalização do sistema de irrigação para otimizar o uso da água e a saúde das plantas.

3.1. Dimensionamento do sistema de irrigação

Utilizando os dados coletados em campo, juntamente com informações da literatura especializada sobre gestão de hortas e dimensionamento de sistemas de irrigação, consolidou-se os parâmetros de entrada no programa de cálculo do dimensionamento, conforme apresentado na Tabela 2. Realizou-se uma comparação entre o uso de aspersores, que é prática corrente e a implementação de um sistema de micro gotejamento. A decisão de adotar o sistema de micro gotejamento foi baseada em sua maior eficiência de aplicação da água [13], além da observação de que a área adjacente aos canteiros não é aproveitável para cultivo. Portanto, a utilização de aspersores resultaria em desperdício de água nas áreas entre canteiros, enquanto o micro gotejamento foca a irrigação diretamente na zona radicular das plantas, maximizando o uso da água e minimizando as perdas.

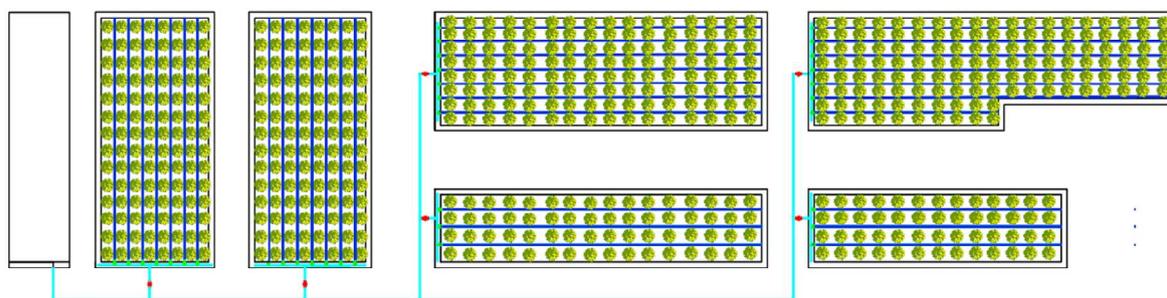


Figura 2: Disposição das linhas de irrigação. Fonte: autores.

Com isso, obteve-se os resultados do cálculo, que foram consolidados na Tabela 3, possibilitando uma análise e seleção de materiais comerciais a serem aplicados na horta descritos na Tabela 4.

Tabela 2: Parâmetros de entrada no programa de dimensionamento.

Parâmetro	Descrição
Área de plantio total	46,7 m ²
Espaçamento desejado entre linhas	0,258 m
Taxa máxima de evapotranspiração de referência no local de plantio	6 mm/h (1,7µm/s) [15]
Fator de cultura máximo	1,25 [16]
Fator de ajuste	1
Frequência de irrigação	A cada dois (2) dias
Eficiência do emissor	95% [13]
Vazão do emissor	1,6 L/h (0,44µm ³ /s) [17]
Espaçamento entre emissores	0,2 m [17]

Fonte: autores.

Tabela 3: Parâmetros de saída no programa de dimensionamento

Parâmetro	Descrição
Metragem de linha de gotejamento necessária	168,99 m
Vazão máxima em pressão de serviço ideal	$3,74 * 10^{-4} m^3/s$
Lâmina líquida de água	7,5 mm
Lâmina bruta de água	7,9 mm
Diâmetro da linha principal	15,43 mm

Fonte: autores.

Tabela 4: Lista simplificada de materiais selecionados após cálculos

Uso	Descrição do material e dimensões (diâmetro x comprimento)
Linha principal	Tubo cego Pebd (16 mm x 13 m)
Linha de derivação	Tubo cego Pebd (16 mm x 21 m)
Linha lateral (micro gotejamento)	Tubo com micro gotejador integrado não compensante plano com vazão nominal de 1,6 L/h e espaçamento 0,2 m (16 mm x 169 m)

Fonte: autores.

3.2. Automação

A automaização foi desenvolvida para aprimorar o gerenciamento da irrigação dos canteiros, começando pela segurança: a energia fornecida pela infraestrutura da escola é distribuída através de um painel equipado com disjuntores e dispositivo DR. Este painel também conta com fontes de alimentação de 5V e 12V, responsáveis por energizar os circuitos, sensores e válvulas do sistema. O projeto se divide em três subsistemas principais, ilustrados na Figura 3: a Caixa de Alimentação Principal (QVCA), a Caixa de Controle (QVCC) e a Caixa de Dispositivos Hidráulicos (QVH). A QVCA supre a QVCC, que, por sua vez, gerencia de forma automatizada a operação das válvulas na QVH, possibilitando ajustes específicos para cada canteiro conforme necessário. Em situações de interrupção no fornecimento de energia ou manutenção do sistema eletrônico, é possível ativar um sistema de *bypass*, com válvulas manuais para cada canteiro, assegurando que a irrigação possa continuar de forma manual. Os

componentes selecionados para essa configuração são listados de maneira resumida na Tabela 5, evidenciando a estrutura modular e flexível do sistema proposto.

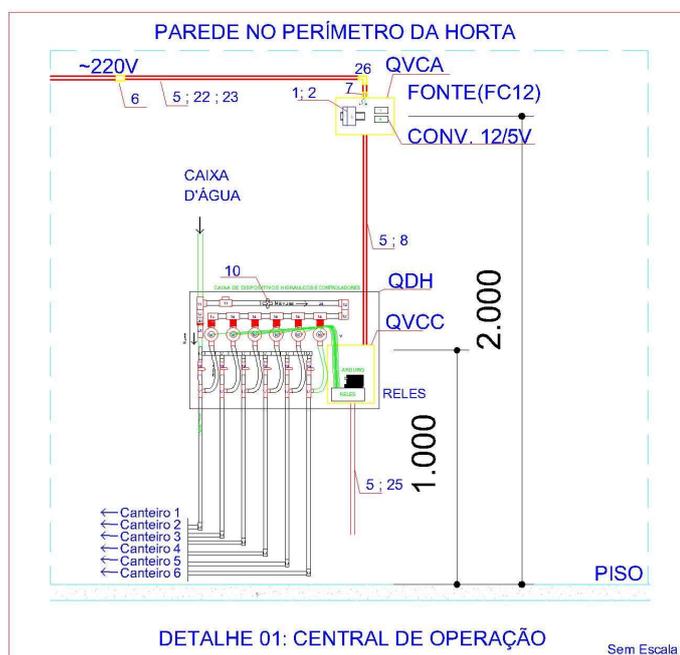


Figura 3: Esquemático da proposta de automação. Fonte: autores.

Tabela 5: Lista simplificada de materiais selecionados para a automação.

Aplicação	Descrição do material selecionado
Microcontrolador	Arduino UNO
Proteção do sistema elétrico e usuário	Interruptor DR Bipolar 30Ma 25A 230Vca
Proteção do sistema elétrico	Disjuntor 1P10A
Converter corrente alternada para contínua	Fonte Chaveada 12V
Sensor de umidade no solo	Sensor capacitivo de umidade 5V para Arduino
Válvula	Válvula Solenoide 12V NF

Fonte: autores.

4. Discussão

A transição das fitas e aspersores para um sistema de micro gotejamento representa uma estratégia eficiente para reduzir o desperdício de água e aumentar a produtividade da horta. Esta mudança introduz um sistema automatizado capaz de fornecer informações em tempo real sobre as condições do solo e a umidade nas proximidades das raízes das plantas. Isso reduz as imprecisões associadas a métodos baseados em estimativas de evapotranspiração, que podem variar com as mudanças climáticas, e a capacidade de absorção do solo, que também pode ser afetada por fatores como compactação e alterações nas suas propriedades. Tal avanço contribui para a sustentabilidade ambiental através da redução do consumo de água e beneficia a escola ao incrementar a produção de hortaliças para o consumo dos estudantes. Optar pelo uso de aspersores, ignorando o potencial desperdício causado pela dispersão de água fora da área de cultivo, representaria um aumento de 28,5% no consumo de água, segundo a Embrapa [13].

A transição mencionada possibilita também uma abordagem de ensino holístico e integrador, permitindo que os próprios estudantes do fundamental, já envolvidos no manejo e cultivo, vão poder ir além, abarcando uma perspectiva nova, voltada à sustentabilidade na produção alimentar em contextos comunitários. Esta experiência diferenciada combina o uso da tecnologia envolvendo automatização e programação de microcontroladores, com práticas de cultivo sustentáveis, criando um ambiente educacional único que fomenta a inovação e a responsabilidade ambiental. Alinhado às diretrizes da Base Nacional Comum Curricular (BNCC) [18], este enfoque promove uma educação que prepara os alunos para enfrentar os desafios contemporâneos, equipando-os com conhecimento, habilidades e valores necessários para uma participação ativa e consciente na sociedade.

Um aspecto a considerar é a falta de precisão no cálculo das perdas de carga. Essa imprecisão decorre da ausência de dados específicos sobre as perdas de carga distribuídas nos tubos cegos, bem como das perdas localizadas nos gotejadores e conexões. Uma análise detalhada das especificações técnicas dos tubos revelou que, mantendo uma pressão de entrada conforme o recomendado pelo fabricante, o sistema pode ser empregado em escala reduzida de forma segura. Assim, o limite de até 100 m comprimento é considerado adequado para o cálculo de perdas de carga e variações na vazão de cada gotejador, assegurando a eficácia do sistema de irrigação proposto sem comprometer seu desempenho [17].

5. Considerações Finais

O projeto de implementação do sistema automatizado de irrigação da horta escolar apresentado, significa uma oportunidade rica de aprendizagem tanto de estudantes de graduação em engenharia quanto de alunos do ensino fundamental. Esse projeto transcende a simples aquisição de conhecimentos técnicos, promovendo uma série de benefícios educacionais e de desenvolvimento pessoal para ambos os grupos, além de incentivar os professores da escola a incluírem sustentabilidade, tecnologia e educação ambiental no currículo dos alunos.

Para os estudantes de graduação em engenharia, o projeto serve como uma plataforma prática para aplicar e expandir seus conhecimentos teóricos em um contexto real de resolução de problemas. Eles ganham experiência direta no projeto, dimensionamento e implementação de sistemas de irrigação, além de desenvolverem habilidades em automação e programação de microcontroladores. Além disso, a abordagem de aprendizagem baseada em problemas (PBL) estimula o desenvolvimento de competências essenciais, como trabalho em equipe, pensamento crítico, e capacidade de inovação. Essas habilidades são importantes para a formação de engenheiros aptos a contribuir para a solução dos desafios contemporâneos, especialmente aqueles relacionados à sustentabilidade e à eficiência dos recursos.

Para os alunos do ensino fundamental, o envolvimento no projeto oferece uma introdução aos princípios da sustentabilidade e da ciência ambiental. Ao participar ativamente no manejo da horta e na observação do sistema de irrigação em ação, os alunos aprendem sobre o ciclo da água, a importância da conservação dos recursos hídricos e os fundamentos da produção sustentável de alimentos. Este aprendizado prático é complementado pela oportunidade de interagir com tecnologias de automação, despertando o interesse por áreas STEM (ciência, tecnologia, engenharia e matemática) e potencialmente inspirando futuras carreiras nessas disciplinas. Além disso, o projeto promove valores de responsabilidade ambiental e social, ao encorajar os estudantes a considerarem como suas ações impactam o mundo ao seu redor.

Por fim, cabe ainda melhorias em projetos futuros, como: irrigação com água de reuso; implementação de captação de energia sustentável para alimentação dos componentes elétricos

e eletrônicos. E, para escalabilidade do projeto é necessário investir na pesquisa e nos cálculos de perda de carga para melhor dimensionar o sistema.

Referências

- [1] UNESCO. (s.d.) Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 13 nov. 2023.
- [2] UNESCO. (2017). Educação para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: Objetivos de Aprendizagem. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000252197>. Acesso em 30/03/2024.
- [3] UNESCO INTERNATIONAL CENTRE FOR ENGINEERING EDUCATION. Engenharia para o desenvolvimento sustentável: resumo. 2021. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375634_por.locale=en>
- [4] UNESCO. (s.d.). Education for Sustainable Development. <https://en.unesco.org/themes/education-sustainable-development>
- [5] MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. Resolução N° 2, de 24 de Abril de 2019. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolu%C3%87%C3%83o-n%C2%BA-2-de-24-de-abril-de-2019-85344528>
- [6] Cribb, Sandra L. de S. P. Educação Ambiental através da horta escolar: algumas possibilidades. Educação Ambiental em Ação. Disponível em: <https://revistaea.org/artigo.php?idartigo=2984>. Acesso em: 30/03/2024.
- [7] Ribeiro, M. M. A.; Valle Junior, O.; Martins, C. P. (2022). Hortomação: Sistema de Automação em horta utilizando IOT em parceria com escola estadual. V Simpósio de Tecnologia da FATEC Jales. Disponível em: https://ric.cps.sp.gov.br/handle/123456789/11454?locale=pt_BR. Acesso em: 30/03/2024.
- [8] Pacheco, R. S. et al. (2020). Horta escolar: Incentivo ao cultivo e prática sustentável no ensino de Química. Anais do 39º Encontro de Debates sobre o Ensino de Química: alfabetizar em Química: os desafios da era moderna e 1º Encontro do Mestrado Profissional em Química da Região Sul, 24 a 25 de outubro de 2019, Lajeado, RS / Eniz Conceição Oliveira et al. (Org.) – Lajeado : Editora Univates, 2020.
- [9] SAVIN-BADEN, M.; HOWELL, M. C. Foundations of problem-based learning. New York: McGraw-Hill Education, 2004.
- [10] GRAAFF, E.; KOLMOS, A. Management of change: implementation of problem-based and project-based learning in engineering, Netherlands: Sense Publishers, 2007.
- [11] VILLAS-BOAS, V.; MARTINS, J. A.; GIOVANNINI, O.; SAUER, L. Z., BOOTH, I. A. S. (Org.). Aprendizagem baseada em problemas: estudantes de ensino médio atuando em contextos de ciência e tecnologia. 1ed. Brasília: ABENGE, 2016.
- [12] RIBEIRO, L. R. C; MIZUKAMI, M. G. N. Uma implementação da aprendizagem baseada em problemas (PBL) na pós-graduação em Engenharia sob a ótica dos alunos. Semina: Ciências Sociais e Humanas. Londrina, v. 25, p. 89-102, 2004.
- [13] MAROUELLI, W. A.; DE C. E SILVA, W. L. Circular Técnica 98, Seleção de Sistemas de Irrigação. ISSN 1415-3033.

[14] DE ALBUQUERQUE, P. E. P. Circular Técnica 136, Estratégias de Manejo de Irrigação: Exemplos de Cálculo. ISSN 1518-4269.

[15] InfoClima. Disponível em: <<https://www.cnpaf.embrapa.br/infoclima/>>. Acesso em: 13 nov. 2023.

[16] DOS SANTOS, C. R. Irrigação de Hortaliças. [s.l: s.n.].

[17] Streamline™ X. Disponível em: <<https://www.netafim.com/en/products-and-solutions/product-offering/drip-irrigation-pr>> . Acesso em: 27 nov. 2023.

[18] Diretrizes curriculares nacionais da educação básica. [s.l: s.n.].

Aplicação da abordagem ecossistêmica na Avaliação do Ciclo de Vida

Application of the ecosystem approach in Life Cycle Assessment

Marina Silva Seabra da Rocha, Mestra e Doutoranda, UFMG

marinasseabra@gmail.com

Eleonora Sad de Assis, Profa. Doutora, UFMG

eleonorasad@yahoo.com.br

Resumo

Tem se buscado por métodos padronizados e coerentes para a avaliação do desempenho ambiental no setor da construção civil. A ACV, apesar de suas limitações, tem sido o método por excelência para a execução de tal tarefa. Dado o potencial desta, o objetivo deste estudo é propor uma melhoria metodológica e conceitual do modelo de ACV, visando incorporar os preceitos da teoria ecossistêmica, de modo a mitigar as suas falhas, focando na avaliação do desempenho ambiental de materiais de construção. Por meio de uma análise crítica da literatura normativa da ACV e sua comparação conceitual com os fundamentos ecossistêmicos, foi possível incorporar a estrutura de cascata e as categorias de impacto da abordagem ecossistêmica ao modelo da ACV. Isto resultou em na ampliação das fronteiras do sistema e na consolidação de um novo modelo de caracterização.

Palavras-chave: ACV; Serviços Ecossistêmicos; Materiais de Construção

Abstract

There has been a search for standardized and coherent methods for evaluating environmental performance in the construction sector. Despite its limitations, LCA has been the most used method to perform this task. Given its potential, this study aims to propose an improvement of the methodological and conceptual framework of the LCA model, focused on assessing the environmental performance of construction materials. The aim is to incorporate the precepts of ecosystem theory to mitigate its flaws. Analyzing the LCA normative and making a conceptual comparison with the ecosystem foundations, it was possible to embody the cascade framework and the impact categories of the ecosystem's approach in the LCA model. The result was the expansion of the system boundaries and the consolidation of a new characterization model.

Keywords: LCA; Ecosystem Services; Building Materials

1. Introdução

Sabe-se que os processos humanos em geral, como os processos industriais da construção civil, criam pressões que podem afetar o estado dos ecossistemas e suas funções. Isto pode impactar a natureza e o nível de provisão de serviços ecossistêmicos (SE) alterando, então, o bem estar da sociedade [1]. Segundo o último relatório do UNEP [2], o setor da construção civil, no que concerne as fases de operação da edificação e fabricação de materiais, liberou, em 2022, 37% das emissões totais de gás carbônico no mundo.

Uma das técnicas que têm sido amplamente usadas para avaliação das consequências ambientais da fabricação e escolha de materiais de construção, é o método da avaliação do ciclo de vida (ACV). O desenvolvimento dos estudos de ACV se iniciou na década de 1960 e acarretou em um questionamento por parte da sociedade sobre os limites de exploração de recursos naturais [3]. Esta técnica contribui para a análise da sustentabilidade na medida em que, a partir dela, se pode verificar em quê é possível melhorar a produção em termos ambientais. Ela permite, portanto, corrigir falhas e, graças aos vários processos de rotulagem que se baseiam no conceito de ACV, o consumidor pode escolher, dentro das suas possibilidades, produtos de companhias que se adequam a uma lógica menos impactante ambientalmente [4].

A ACV, no entanto, possui diversas limitações apontadas por alguns estudiosos. Dentre elas, pode-se destacar a visão reducionista que contabiliza apenas aspectos e indicadores físicos, como liberação de emissões e resíduos. Além disto, ao focar no sistema de produto, ela não é capaz de mensurar diretamente as consequências das emissões para o meio. Este método também é considerado complexo, subjetivo e que lida com uma multiplicidade de indicadores de categoria de impactos. Estes últimos, por terem natureza distinta, não podem ser diretamente comparados. Isto demonstra a necessidade de uma base conceitual mais holística e padronizada, mas, ao mesmo tempo, de fácil manipulação, focada nas consequências para o meio e baseada em critérios e indicadores mais objetivos.

Acredita-se que a inserção das bases conceituais ecossistêmicas seja uma resposta pertinente às limitações da técnica apresentada. Contudo, não há pesquisas que mostrem como incorporar a abordagem ecossistêmica no método de ACV. Wanderwilde e Newell [5] revelam que as duas áreas de pesquisa, embora compartilhem objetivos sustentáveis, têm poucos pontos de interseção. Zari [6], todavia, é a primeira pesquisadora a sugerir um método para a incorporação dos conceitos ecossistêmicos em ACV para materiais de construção. A autora, no entanto, não adentra na reestruturação dos conceitos e fluxos ligados ao sistema de produto, de forma a incorporar os preceitos ecossistêmicos neles. Zari, em seu artigo, salienta que um dos grandes desafios da pesquisa na área concerne o entendimento de como os materiais impactam os serviços ecossistêmicos e, portanto, em se fazer a abordagem ecossistêmica aplicável à seleção de materiais de construção. Além disto, é preciso elaborar definições, métricas e métodos que sejam internacionalmente aceitos no que concerne à avaliação de serviços ecossistêmicos. Com isto, será possível compreender melhor como estes interferem e são modificados por sistemas de origem antrópica, como os sistemas produtivos e sociais, em diferentes escalas espaciais e temporais [6].

Por isto, na presente investigação, indaga-se onde é possível aplicar os conceitos da abordagem ecossistêmica dentro do método da ACV. O desafio aqui é propor uma melhoria metodológica do modelo de ciclo de vida, de modo a mitigar suas limitações e focar o procedimento na consequência do processo de fabricação e escolha de materiais de construção na provisão de serviços ecossistêmicos.

2. Procedimentos Metodológicos

Esta pesquisa exploratória de caráter descritivo se fundamenta na revisão de literatura crítica. As publicações utilizadas de base sobre SE totalizaram em 10. Todas tratam da abordagem ecossistêmica baseada no seu modelo de cascata. Este modelo é o que permite fazer o elo entre o processo produtivo, ou seja, a apropriação dos bens ecossistêmicos e seus impactos na estrutura biofísica do meio, que é a responsável pela provisão dos serviços. Além disto, a abordagem de cascata foi proposta por Haines-Young e Potschin, em 2010, criadores das bases da Classificação Internacional Comum de Serviços Ecossistêmicos (CICES) [7], fruto de esforços da Agência Ambiental Européia (EEA), visando padronizar as tipologias e o conceitos de SE, de modo a permitir a comparação entre métodos de mapeamento ambiental e de avaliação de SE [8].

Já no que concerne às bases conceituais de ACV, consultou-se as duas normas em vigência, a ABNT ISO NBR 14040 [9] e a ISO NBR 14044 [10]. Elas tratam, respectivamente, dos princípios e estrutura da ACV, e dos requisitos e orientações para a aplicação do método. Foram escolhidas como alvo do estudo porque descrevem e fundamentam com detalhes as bases conceituais e estruturais deste método. Foi feita a leitura integral das normas de forma a se compreender os principais aspectos, fases e conceitos da ACV.

Por meio de um método de procedimento comparativo e monográfico, identificaram-se, em uma análise qualitativa da estrutura metodológica e conceitual, as lacunas de ACV que os preceitos ecossistêmicos poderiam suprir. Assim, propôs-se uma alteração metodológica e estrutural do modelo de ACV, constituído das fases de cultivo e ou extração das matérias-primas até o transporte ao local de aplicação do material, ou seja, o canteiro de obras. Neste introduziram-se os elementos e fluxos da estrutura de cascata. A forma do novo modelo foi, então, ilustrada por meio de um fluxograma.

3. Fundamentação teórica

A seguir, faz-se a fundamentação teórica da pesquisa e a proposta estrutural do novo modelo de ACV do berço ao portão do local de uso – canteiro de obras – para materiais de construção.

3.1 Abordagem Ecossistêmica

Ecossistema é “um complexo dinâmico de comunidades de plantas, animais e microrganismos e seu ambiente não vivo interagindo como uma unidade funcional” [11]. Um ecossistema é composto por uma estrutura formada de elementos bióticos – organismos vivos – e abióticos – elementos químicos e físicos [7], que são a base de cada SE [12]. Estes elementos interagem de forma complexa entre si ao longo do tempo, configurando-se nos processos do ecossistema – ciclos de materiais e os fluxos de energia. A estrutura juntamente com os processos originam as funções ecossistêmicas [13] [14].

As funções ecossistêmicas básicas são a de produção, regulação, suporte e informação. Elas podem se converter em Serviços Ecossistêmicos, caso haja um reconhecimento, por indivíduos ou grupos, do seu potencial de usabilidade [12]. Ao se mobilizar este potencial através do capital humano, social e manufaturado tem-se o fornecimento e a constituição de um SE [12]. Segundo Buckhard e Maes [15], serviços ecossistêmicos são rótulos que se atribuem às coisas úteis que os ecossistemas fazem pelas pessoas. São as contribuições finais

que o meio dá ao bem-estar humano [16] e que resultam, após a mobilização e apropriação destes, em bens e benefícios aos quais as pessoas atribuem um valor [12].

No entanto, esta forma de mobilizar o capital natural quando se fabrica algo, gera pressões antrópicas, impactando o ambiente [15] [17]. A persistência, intensidade e variação no tempo das pressões é que determinam a importância dos impactos no meio e, conseqüentemente, das alterações ecossistêmicas [15]. As principais pressões geradas são as mudanças climáticas, o uso e a exploração do solo e das águas, a alteração de habitats, o aparecimento e reprodução de espécies invasoras, a poluição e eutrofização. Por sua vez, os indicadores das condições ecossistêmicas traduzem as alterações trazidas por estas pressões ao meio. Os impactos, então, podem ser entendidos como o fluxo inverso ao dos serviços. Ou seja, são as conseqüências da influência das atividades humanas no meio [15]. Estes impactos podem ser positivos ou negativos dependendo do nível e tipo de pressão antrópica e das condições do ecossistema. A Figura 1, a seguir, ilustra a relação destes conceitos.

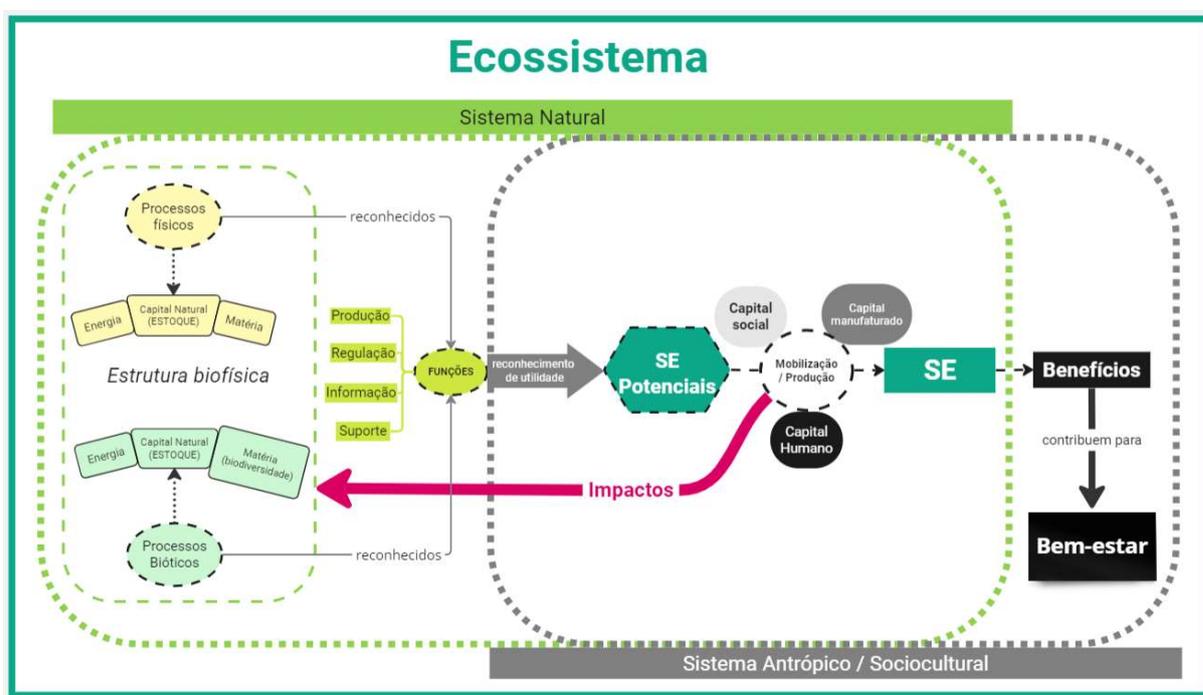


Figura 1: Esquema simplificado de serviços ecossistêmicos. Fonte: elaborado pelos autores.

3.2 Avaliação do Ciclo de vida

Ciclo de vida são as etapas, em sequência, do percurso de um produto ou processo produtivo que podem se iniciar na geração da matéria-prima e se encerrar no descarte final deste [9]. Apesar de o foco ser no produto, informações sobre a condição ambiental dos sistemas limítrofes podem tornar os resultados da ACV mais precisos [10]. O método da avaliação do ciclo de vida tradicional, portanto, é um estudo complexo, comparativo que, segundo a norma, “fornece uma perspectiva sistêmica das questões ambientais e de recursos para um ou mais sistemas de produto” [9]. Seu objetivo é medir os impactos associados ao ciclo de vida de um produto ou serviço. Ela também permite considerar aspectos do meio, dos recursos naturais e da saúde humana, mas não leva em consideração dados econômicos ou sociais[9].

É importante lembrar também que a ACV enfoca apenas impactos ambientais potenciais e não precisos, pois são relativos a uma unidade de referência do produto. Isto quer dizer que neste método se analisa uma quantidade específica, uma amostra, e não o universo completo do produto. Além disto, é fato que existe uma incerteza na modelagem dos impactos, sobretudo em relação àqueles que não são imediatos [9].

Sabe-se que não existe um jeito único e pré-definido de se executar uma ACV. Ela pode ser combinada com outros métodos de modo a permitir uma avaliação mais holística, possibilitando melhorias e incorporação de novidades na técnica, ao utilizar informações de outros métodos [9].

A ACV possui quatro fases: a definição do objetivo e do escopo e do estudo; a análise de inventário; a avaliação de impactos e, por fim, a interpretação [9]. A fase de definição do objetivo compreende o estabelecimento do porquê da realização do estudo, para qual finalidade e para quem este está sendo feito e se os resultados serão divulgados publicamente. Já no escopo, se deve delinear e descrever claramente o sistema e suas funções, as fronteiras, os tipos de impactos e suas categorias, metodologias de avaliação e interpretação, entre outros [9].

O avaliador é quem determina onde começa e termina o sistema, que é a sequência de processos elementares, também conhecidos como fases – constituição da matéria-prima, transporte desta até o local de beneficiamento, processo de transformação em produto, manufatura de materiais e produtos auxiliares ao processo de produção, geração de fontes de energia, uso, manutenção, descarte e ou reciclagem – que são conectados por fluxos de produtos intermediários e que realizam uma ou mais funções. Também é o avaliador que delimita onde estão as fronteiras do processo avaliado, de acordo com o objetivo e o escopo do estudo, conforme os sistemas fornecedores (de entradas) e receptores (de saídas) de fluxos elementares e de produtos do sistema em análise [9].

Estas entradas – de material, produtos ou energia – e saídas – de material, produtos, emissões, resíduos ou energia – são, então, levantadas e quantificadas por meio de cálculo na análise de inventário do ciclo de vida (ICV). Já na avaliação de impacto (AICV), é feita a estimativa da magnitude e da significância dos impactos potenciais do sistema. Nesta fase, também, os resultados do ICV são relacionados às categorias de impacto ambiental, indicadores e pontos finais de categoria, respectivos que são considerados relevantes para o estudo [9]. Isto é feito meio de modelos de caracterização escolhidos. Estes modelos são os conjuntos de processos ambientais correspondentes a cada um dos indicadores de categoria e seus respectivos preceitos utilizados para detalhá-los. Estes devem ser condizentes com o objetivo e escopo da ACV. Porém, sabe-se que não existe uma metodologia bem definida e aceita que relacione de forma precisa dados de inventário com impactos ambientais e pontos finais [10].

Os pontos finais de categoria, por sua vez, são os aspectos externo, ou seja, de um meio (sistema) afetado pelas saídas do sistema em estudo. O indicador de categoria, que é calculado nesta fase, configura-se como a unidade que representa a saída de um processo elementar que impacta o meio. No entanto, este pode ser escolhido em qualquer ponto do mecanismo ambiental.

Os mecanismos são os fenômenos de natureza física, química ou biológica que permitem com que as saídas, que constituem os resultados da análise de inventário, afetem os pontos finais das categorias de impacto [9]. Já as categorias de impacto podem ser traduzidas como as questões ambientais afetadas pelas saídas do sistema, por meio do aspecto ou fator

ambiental. Estes últimos são os processos do sistema que interagem com o meio ambiente. É importante lembrar que a seleção das categorias de impacto deve abranger um conjunto amplo de aspectos ambientais afetados pelo sistema de produto analisado [10].

É mister ressaltar que no método de ACV, se as categorias de impacto, de indicadores e os modelos de caracterização existentes não forem suficientes, novos podem ser definidos. No entanto, o modelo de caracterização de cada indicador deve se basear em um mecanismo ambiental identificável com características espaciais e temporais específicas e fundamentado em dados científicos. Consequentemente, este modelo, os indicadores e categorias resultantes dele devem ser aceitos internacionalmente [10].

Por fim, na interpretação do ciclo de vida, é feito um diagnóstico com base na sumarização da análise de inventário e ou da avaliação de impacto, de acordo com o objetivo e escopo do estudo. Desta forma, são tiradas conclusões, que serão base para recomendações ou tomada de decisão [9].

4. Resultados

Ao se analisar a estrutura metodológica da ACV é possível perceber que a abordagem ecossistêmica pode ser inserida no modelo de sistema de produto por novas delimitações na fronteira do sistema em estudo, em termos dos fluxos elementares e de produtos e na incorporação do modelo de cascata ao modelo de caracterização, conforme figura 2.

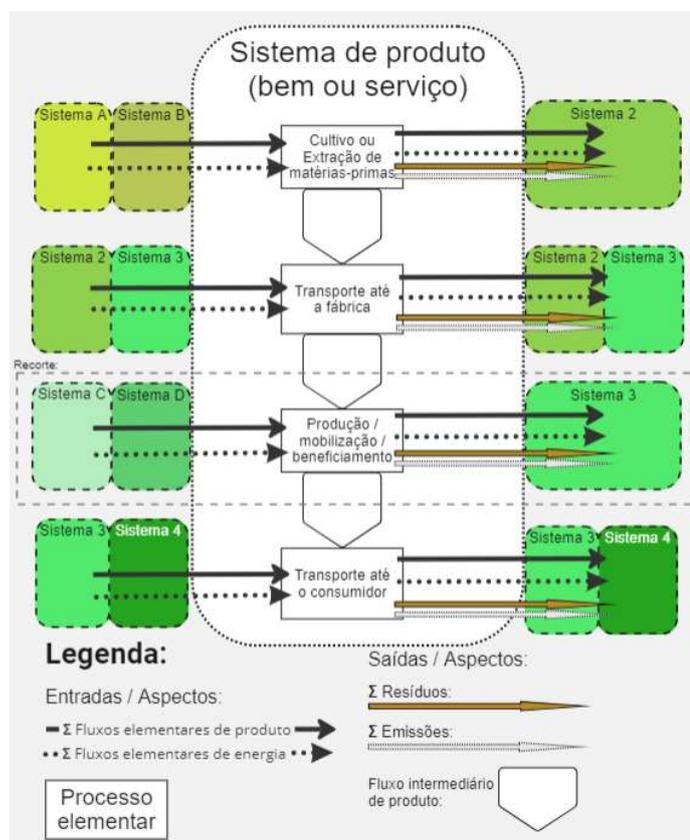


Figura 2: Estrutura de ACV ecossistêmica para materiais de construção. Fonte: elaborado pelos autores.

No que concerne o objetivo desta ACV, esta visa ser executada de forma a permitir com que profissionais da construção civil e também leigos, possam tomar decisões relativas à escolha os materiais que irão empregar em suas obras. Os selecionados deverão ser aqueles

que possuem melhor desempenho ambiental, provado pelo método em estudo. Dado que Zari [6] divide os materiais de construção em três tipos, materiais que são cultivados, materiais que são extraídos ou minerados e materiais que são feitos ou processados, pode-se considerar, para a modelagem genérica do ciclo de vida de qualquer um destes materiais, pelo menos quatro processos elementares inseridos dentro da fronteira: cultivo ou extração de matérias primas; transporte até a fábrica; produção, também conhecida na linguagem ecossistêmica por mobilização e, por fim, transporte até o consumidor, de acordo com a Figura 2.

Os sistemas que estão fora da fronteira e ligados aos processos elementares por entradas são, pelo menos, dois. Isto se dá, pois a energia e os produtos usados naquela fase do ciclo de vida podem vir de lugares diferentes. Igualmente, os ecossistemas que fornecem fluxos de material e energia podem não ser os mesmos do sistema de onde esta é extraída ou cultivada. No caso dos processos de transporte, os ecossistemas que fornecem as entradas podem ser tanto o do local de saída, quanto o de chegada do fluxo intermediário de produto. Ou seja, as atividades de deslocamento impactam o ecossistema de saída do fluxo de produto intermediário pelo consumo de recursos, energia e liberações de emissões e resíduos.

Outrossim, os fluxos elementares entre sistemas, também compreendidos como aspectos ambientais, impactam tanto na provisão de SE dos sistemas que os fornecem para o sistema em estudo, quanto daqueles para os quais as saídas do sistema principal se direcionam. Ou seja, os fluxos elementares de produto e energia – como o consumo de recursos e energia para o processo de beneficiamento do material – quanto os fluxos de produto e liberações – como a liberação de energia na forma de calor, as emissões e os resíduos – afetam o fornecimento de SE nos sistemas fornecedores e receptores.

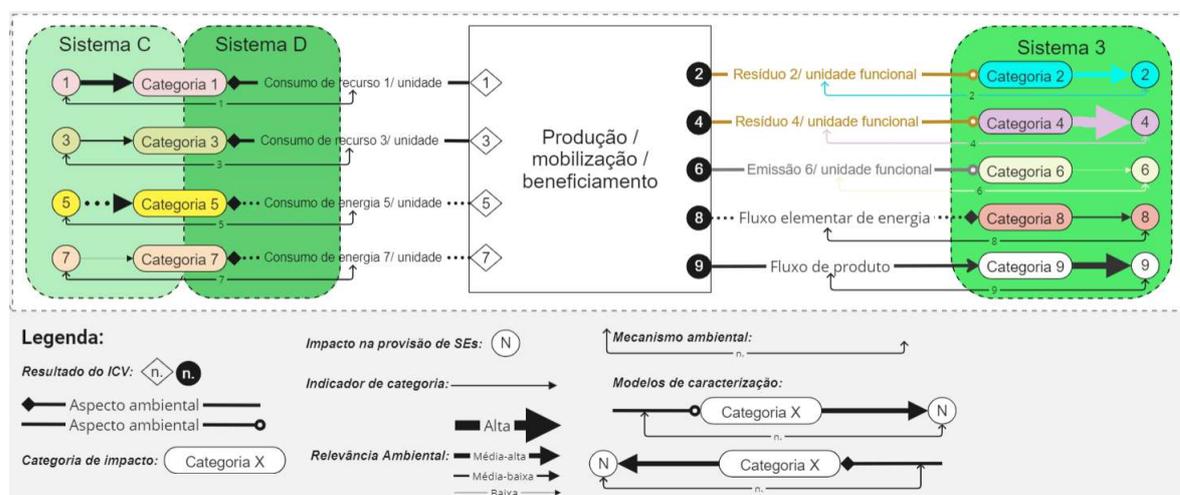


Figura 3: Fluxos em recorte de um dos processos elementares. Fonte: elaborado pelos autores.

Uma mudança maior na estrutura de ACV se faz necessária no que concerne especificamente os fluxos de entrada e saída levantados e quantificados no inventário de ciclo de vida (ICV) e seu relacionamento às categorias de impacto. Conforme a Figura 3, que amplia o processo elementar de produção, pode-se perceber que as categorias de impacto são passíveis de se tornar categorias de impacto em SE. Assim, o ponto final de categoria se transforma de ecossistema impactado, como preconiza a ACV original, em pontos finais na provisão de serviços ecossistêmicos daquele meio afetado. Zari [6] determina, inclusive, que os serviços mais afetados pelo ciclo de vida dos materiais de construção, são a regulação climática, os serviços de purificação, provisão de habitat, água, potável, comida e energia e ciclagem de nutrientes. Estes podem, então, ser pré-definidos como categorias-padrão.

Visto que não há métodos pré-determinados de caracterização dentro da ACV, o modelo de caracterização proposto para se compreender a relação dos resultados do inventário com os impactos na provisão dos SE será o modelo de cascata. Isto pode ser executado, pois este permite relacionar a apropriação dos SE em cada um dos processos elementares com as suas consequências ambientais.

5. Discussões

A abordagem ecossistêmica e a ACV são complementares, conforme declarado em estudos anteriores e, por isso, a primeira pode compor à última segundo recomendação das normas pertinentes. A incorporação da estrutura de cascata e das categoria de impacto, já levantadas por Zari [6] e consolidadas na CICES, tornam a ACV dos materiais de construção melhor estruturada em termos de um padrão e bases conceituais, facilitando a comparação entre sistemas de produtos.

A principal alteração da estrutura de ACV convencional para uma que incorpore SE, segundo a proposição desta investigação, é que as entradas no sistema de produto analisado se tornam impactos nos serviços ecossistêmicos do sistema de onde são extraídos, e as categorias de impacto se tornam categorias de impacto na provisão de SE. Além disto, os sistemas que fazem fronteira com o avaliado devem ser incluídos na análise. Isto faz com que o foco da avaliação deixe de ser apenas o produto para incorporar também as consequências do seu ciclo de vida no meio. Igualmente, a ACV contribui para a abordagem ecossistêmica como um método internacionalmente aceito, tornando mais fácil o entendimento de como os SE são alterados por sistemas humanos. Por isto, apesar de ser um esforço primário, a alteração do modelo de ACV proposta aqui se mostra promissora e coerente com ambas as temáticas.

6. Considerações Finais

Sabe-se, contudo, que ainda há muito o que se investigar na relação metodológica e conceitual entre a ACV e a abordagem ecossistêmica. Contudo, foi possível perceber que a estruturação do modelo de cascata permite traçar um caminho padrão, constituindo-se em um modelo de caracterização único e pré-definido, de modo a mitigar as lacunas que a ACV possui, sobretudo no quesito de ligação entre os resultados de ICV e as categorias de impacto.

Esta investigação permitiu, de modo inicial, apontar em que etapas e em quais conceitos as abordagens em estudo poderiam se fundir de forma coerente. É sabido, no entanto, que a interseção das duas abordagens não precisa se limitar ao contexto dos materiais de construção. Esta pode se estender a qualquer produto que seja fruto da interação do capital natural com o humano e o manufaturado. Contudo, a proposta feita cabe somente ao ciclo de vida de berço ao portão do canteiro de obras, não englobando as fases de uso, manutenção e descarte ou reciclagem do material. Portanto, para se traçar um modelo genérico para o ciclo de vida de produtos e serviços em geral, que incorpore todas as fases, são necessárias maiores investigações. Igualmente, sabe-se que nos resultados de ICV a falta das dimensões espacial e temporal resulta em incertezas, assim como na avaliação da provisão de SE. Ou seja, este ainda é um desafio a ser superado em ambas as disciplinas.

O produto desta pesquisa exploratória, portanto, se configura como inédito no âmbito da ACV, e pode ser incorporado em softwares ou plataformas para avaliação do desempenho ambiental na construção civil, como o Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (SIDAC). Com isto, as conclusões destes estudos podem ser tornar mais precisas e voltadas para consequências efetivas dos sistemas analisados no meio ambiente.

Referências

- [1] TEN BRINK, Patrick. **Natural capital**: an old concept with a new life. In: MONNOYER-SMITH, Laurence; PERRISSIN FABERT, Baptiste (eds.). *Nature and the wealth of nations*. Paris: Service de l'Économie, de l'Évaluation et de l'Intégration du Développement Durable: Commissariat Général au Développement Durable, 2015, p. 41-50. (Coleção Études et documents). Disponível em: https://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/docs/Temis/0083/Temis-0083488/22322_ENG.pdf. Acesso em: 13 fev. 2023.
- [2] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Global Status Report for Buildings and Construction - Beyond foundations**: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector. Nairobi: Global Alliance for Buildings and Construction:UNEP, 2024. 99 p.
- [3] COLTRO, Lêda (org.). **Avaliação do ciclo de vida como instrumento de gestão**. Campinas: CETEA/ITAL, 2007. 75 p.
- [4] BRASIL. Ministério da Ciência Tecnologia Inovações e Comunicações. *In: _____ ACV*, [Brasília]: IBICT, [2018]. Disponível em: <https://acv.ibict.br/sobre/quem-somos/>. Acesso em: 28 mar. 2024.
- [5] VANDERWILDE, Calli P.; NEWELL, Joshua P. Ecosystem services and Life cycle assessment: A bibliometric review. **Resources, Conservation & recycling**, [S.l.]: Elsevier, v. 169, n. 105461, p. 1-15. 2010.
- [6] ZARI, Maibritt Pedersen. Ecosystem services impacts as part of building materials selection criteria. **Materials Today Sustainability**, [S.l.]: Elsevier, v. 4, n. 3, p. 1-10. 2019.
- [7] LA NOTTE, Alessandra; d'AMATO, Dalia; MÄKINEN, Hanna; PARACCHINI, Maria Luisa; LIQUETE, Camino; EGOH, Benis; GENELETTI, Davide; CROSSMAN, Neville D. Ecosystem services classification: A systems ecology perspective of the cascade framework. **Ecological Indicators**, [S.l.]: Elsevier, v. 74, n. 1, p. 392–402, 2017.
- [8] EMBRAPA. Serviços ambientais. *In: _____*. **Site Oficial da Embrapa**, Brasília, DF: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, [S.d.]. Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-servicos-ambientais/sobre-o-tema>. Acesso em: 28 mar. 2024.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14040**: Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2014a. 22 p.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14044**: Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro: ABNT, 2014b. 46 p.
- [11] MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Secretaria de Biodiversidade e Florestas Programa Nacional de Conservação da Biodiversidade. **A Convenção sobre Diversidade**

Biológica: CDB Cópia do Decreto Legislativo nº 2, de 5 de junho de 1992. Brasília, DF: MMA, 2000. 30 p. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/textoconvenoportugus.pdf>. Acesso em: 03 fev. 2023

[12] SPANBERG, Joaquim H.; VON HAAREN, Christina; SETELLE, Josef. The ecosystem service cascade: Further developing the metaphor. Integrating societal processes to accommodate social processes and planning, and the case of bioenergy. **Ecological Economics**, [S.l.]: Elsevier, v. 104, 2014, p. 22–32.

[13] DE GROOT, Rudolf; WILSON, Mathew A.; BOUMANS, Roelof M. J. 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. The dynamics and value of ecosystem services: integrating economic and ecological perspectives. **Ecological Economics**, [S.l.]: Elsevier, v. 41, n. 3, p. 393–408, jun. 2002. Edição Especial.

[14] PAVAN, Ana Laura Raymundo. **Avaliação de Impactos do Ciclo de Vida no Brasil:** Desenvolvimento de fatores de caracterização regionais para serviços ecossistêmicos relacionados à qualidade do solo. 2019. 190 f. Tese (Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2019. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-04042019-105842/publico/TesePavanAnaLauraRaymundoCorrig.pdf>. Acesso em: 03 fev. 2024.

[15] BUCKHARD, Benjamin; MAES, Joaquim. **Mapping Ecosystem Services**. Sofia: Pensoft Publishers, 2017. 374 p.

[16] HAINES-YOUNG, Roy; POTSCHIN, Marion. **Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1:** Guidance on the Application of the Revised Structure. Nottingham, Reino Unido: Fabis Consulting, 2018. Versão 5.1. Disponível em: <https://cices.eu/content/uploads/sites/8/2018/01/Guidance-V51-01012018.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2023

[17] COSTANZA, Robert; de GROOT, Rudolf; BRAAT, Leon; KUBISZEWSKI, Ida; FIORAMONTI, Lorenzo; SUTTON, Paul; FARBER, Steve; GRASSO, Monica. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? **Ecosystem Services**, [S.l.]: Elsevier, v. 28, n. Part A, p. 1–16, 2017.

Desenvolvimento de modelo para determinação da resistência à compressão axial do concreto a partir de ensaios não destrutivos: ultrassonografia e resistividade elétrica

Development of a model to determine the axial compression resistance of concrete based on non-destructive tests: ultrasonography and electrical resistivity

Francisco Luiz Campos Lopes

francisco.campos.lopes@gmail.com.br

Fernando do Couto Rosa Almeida

fernando@demc.ufmg.br

Laura Viana de Melo

laboratorio@piengenharia.com.br

Arthur Mader Portela Garcia Carvalho

laboratorio@piengenharia.com.br

Resumo

O artigo propôs o desenvolvimento de um modelo para estimar a resistência à compressão axial do concreto utilizando ensaios não destrutivos, como a determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica e resistividade elétrica. Foram utilizados corpos de prova moldados em laboratório com diferentes cimentos, corpos de prova de concreto provenientes de obras e corpos de prova de argamassas estruturais. Os resultados mostram que os ensaios não destrutivos permitem estimativas precisas da resistência à compressão com modelos desenvolvidos a partir de algoritmos de *machine learning*. Os modelos obtidos a partir de algoritmos de *machine learning* possibilitaram a estimativa da resistência à compressão axial em campo e em laboratório com coeficientes de determinação maiores que 0,85 e 0,95 respectivamente.

Palavras-chave: Resistividade elétrica do concreto; Resistência à compressão axial do concreto; Velocidade do pulso ultrassônico no concreto;

Abstract

The article proposed the development of a model to estimate the axial compressive strength of concrete using non-destructive tests, such as determining the ultrasonic wave propagation speed and electrical resistivity. Test specimens molded in the laboratory with different cements, concrete specimens from construction sites and structural mortar specimens were used. The results show that non-destructive tests allow accurate estimates of compressive strength with models developed from machine learning algorithms. The models obtained from machine learning algorithms made it possible to estimate the axial compressive strength in the field and in the laboratory with coefficients of determination greater than 0.85 and 0.95 respectively.

Keywords: Concrete electrical resistivity; Concrete axial compressive strength; Ultrasonic pulse velocity in concrete.

1. Introdução

A resistência à compressão axial do concreto é a propriedade identidade do compósito, regendo a grande parte das outras propriedades e sendo a mais requisitada na construção civil. O concreto usualmente é identificado pela sua classe de resistência, norteando desde o projeto estrutural para concepção de uma estrutura, até a análise estrutural para desenvolvimento de um reforço.

A resistência à compressão axial característica do concreto f_{ck} , normatizada pela ABNT NBR 12655:2015 [1], expressa de modo estatístico a resistência à compressão axial, com um índice de confiabilidade de segurança do valor de 95%, isto é, dado um número n de amostragem, 95% dos valores obtidos para resistência serão maiores que o f_{ck} .

Além dos cálculos estruturais, a resistência do concreto norteia a sua durabilidade, conforme as normas brasileiras, ABNT NBR 12655:2015 [1] e ABNT NBR 6118:2023 [2], onde se tem a resistência à compressão como fator essencial para o projeto de estruturas, dada uma determinada classe de agressividade ambiental. Diversos autores na literatura consideraram a resistência à compressão axial como fator regente em suas equações empíricas ou modelagens matemáticas para se determinar propriedades da durabilidade do concreto.

A resistência à compressão axial do concreto é obtida de diversas formas na construção civil, desde o controle tecnológico realizado com corpos de prova durante as concretagens na fase de concepção, até as extrações e rupturas de testemunhos na fase de reforço e análise estrutural. Quando consideradas estruturas antigas, industriais ou portuárias e de difícil acesso, o método de extração e ruptura se torna difícil, seja pelos custos, prazo, necessidade de escoramento ou impossibilidade de extração, além da mobilização de equipamentos e espaço e necessidade da recomposição ao final.

Diante dessa perspectiva, o presente artigo propõe uma metodologia para obtenção da resistência à compressão do concreto através dos ensaios não destrutivos de determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica longitudinal e transversal no concreto e determinação da resistividade elétrica superficial e volumétrica do concreto.

Foram utilizados corpos de prova moldados em laboratório com o mesmo traço, porém utilizando cimentos de composição química distinta, corpos de prova provenientes de obra com traços desconhecidos e corpos de prova de argamassas estruturais.

2. Metodologia

2.1. Espaço amostral

Considerou-se o espaço amostral para o desenvolvimento do estudo, 3 situações de análises. A primeira situação seria a determinação da resistência à compressão com a variação do tipo de cimento para um mesmo traço, levantando a hipótese que o modelo seria capaz de avaliar a microestrutura do concreto, sendo mais assertivo que modelos matemáticos que não consideram a química do cimento, como a lei de Abrams.

A segunda situação trata de concretos moldados em obra com traço desconhecidos e resistência à compressão axial distinta, ampliando a abrangência do modelo. A terceira e situação trata da utilização de argamassas estruturais com e sem aditivos, utilizadas em uma recuperação estrutural.

Para concepção dos corpos de prova de mesmo traço e cimentos diferentes, considerou se a carta traço para um concreto de classe C25 (Tabela 1). A carta traço foi desenvolvida pela

empresa Consultare-Labcon e o concreto foi rodado nas dependências da Torrent Engenharia em Belo Horizonte-MG. Utilizou-se como aglomerantes os cimentos CP V ARI PLUS 40, CP II E 40 e CP III RS fornecidos pela unidade da CSN em Pedro Leopoldo-MG. Foram consideradas 10 amostras para cada tipo de concreto.

Tabela 1: Valores estimados considerando o traço de concreto adotado para os concretos de mesma resistência e cimentos distintos

<i>Resistência à compressão pretendida aos 28 dias</i>	<i>Resistência à compressão calculada pela curva de Abrams aos 28 dias</i>	<i>Relação água/cimento</i>	<i>Traço em volume</i>	<i>Consumo de cimento</i>	<i>Densidade estimada do concreto</i>
25 MPa	26,95 MPa	0,59	1:1,45:2,05:0,59	349 kg/m ³	2346 kg/m ³

O cimento CP V ARI PLUS apresenta apenas o teor de 0 a 10% de material carbonático, de comportamento filler, como adição (ABNT NBR 16697:2018) [3]. O cimento CP V ARI PLUS é de alta resistência inicial, tendo um maior teor de C3S.

O cimento CP III 40 RS pode um teor de escória granulada de alto-forno entre 35% a 75%, de acordo com o especificado na ABNT NBR 16697:2018 A permeabilidade hidráulica do concreto pode ser reduzida em até 100 vezes com a adição de escória de alto forno [4, 5]. O cimento CP II 40 E por sua vez apresenta 28% de teor de escória de alto forno.

Os corpos de prova moldados em obra de traço desconhecidos e resistência à compressão distintas foram fornecidos pela Consultare-Labcon, sendo 02 amostras para cada uma das resistências de 25, 35 e 45 Mpa.

Os corpos de prova de argamassa estrutural foram fornecidos pela Torrent Engenharia provenientes de uma obra de recuperação em andamento. Os corpos de prova tiveram traços distintos, expressos na Tabela 2, sendo constituídos pelo microconcreto fluido Emckrete 50 da Mc Bauchemie e possuindo ou não a adição do cristalizante Xypex da Mc Bauchemie e do inibidor de corrosão MCI 2005 da Corr Solutions.

Tabela 2: Espaço amostral considerado para os corpos de prova de argamassas estruturais fornecidos

<i>Composição</i>	<i>Tempo de cura</i>	<i>Tipo de cura</i>	<i>Conjunto amostral</i>
Emckrete 50	28 dias	Micro aspersão de água em obra	A
		Imersão em água	B
	64 dias	Micro aspersão de água em obra	C
		Imersão em água	D
Emckrete 50 + Xypex	28 dias	Micro aspersão de água em obra	E
		Imersão em água	F
	64 dias	Micro aspersão de água em obra	G
		Imersão em água	H
Emckrete 50 + Mci 2005	28 dias	Micro aspersão de água em obra	I
		Imersão em água	J
	64 dias	Micro aspersão de água em obra	K
		Imersão em água	L
Emckrete 50 + Xypex + Mci 2005	28 dias	Micro aspersão de água em obra	M
		Imersão em água	N
	64 dias	Micro aspersão de água em obra	O
		Imersão em água	P

2.2. Ensaios realizados

Para a caracterização mecânica foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial das amostras seguindo a ABNT NBR 5739:2018 [6] Os ensaios foram realizados no laboratório da Consultare Labcon em Belo Horizonte-MG.

Os ensaios não destrutivos de determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica longitudinal e transversal no concreto (ABNT NBR 8802:2019) [7] e de determinação da resistividade elétrica superficial (UNE 83988-2:2014) [8] e volumétrica (ASTM C1876-19) [9] do concreto foram realizados no laboratório da PI Engenharia em Belo Horizonte-Mg.

Para realização do ensaio de determinação da velocidade do pulso ultrassônico utilizou-se o equipamento Pundit PL-200 da Proceq. Utilizou-se um transdutor de 54Hz para determinação da velocidade da onda P e um transdutor de 40Hz para determinação da velocidade da onda S. As medições foram realizadas de modo direto nos corpos de prova e testemunhos de 10x20cm. As leituras foram realizadas com as amostras em sua umidade natural.

O ensaio de determinação da resistividade elétrica superficial e volumétrica do concreto foi realizado com o equipamento Resispod da Proceq e com o aparato de medição de resistividade volumétrica (Bulk resistivity) da Proceq, respectivamente. As leituras nas amostras foram realizadas com após 72 horas de saturação por imersão em água.

2.3. Modelos de cálculo

Para obtenção da resistência à compressão estimada dos corpos de prova através dos resultados das velocidades de pulso ultrassônico, utilizou-se a equação proposta pela IS 13311-Parte [10] e pela ASTM C 597:2002 [11], apresentada na equação 01 e 02 respectivamente.

$$\rho = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (1)$$

Sendo:

V_p = velocidade longitudinal;

V_s = velocidade transversal;

ρ = coeficiente de poisson

$$E_d = 2V_s^2(1 + \rho)\mu_d \quad (2)$$

Sendo:

E_d = Módulo de elasticidade dinâmico;

μ_d = Densidade do concreto;

A resistência à compressão axial é obtida utilizando a equação proposta no item 8.2.8 da ABNT NBR 6118:2023 [2] considerando concretos de 20 a 30 MPa, expressa na equação 3:

$$E_{ci} = \alpha_E 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad (3)$$

Sendo:

α_E = Fator de correção para tipo de agregado utilizado;

Para o modelo de cálculo em realizado em aprendizado de máquina, utilizou-se o algoritmo XGBoost. O XGBoost é um impulsionador de gradiente extremo que combina parâmetros de forte aprendizado com parâmetros de fraco aprendizado, utilizando árvores de regressão. O algoritmo melhora a performance gerenciando a complexidade do modelo de

predição além de reduzir a sobreposição de dados durante o tratamento [11]. O XGBoost se apresenta com a melhor viabilidade para a solução de problemas que envolva regressão [12].

Para o modelo no XGBoost, adotou-se como o espaço amostral a análise dos dados expandidos baseado em sua média e desvio padrão utilizando uma distribuição normal Gaussiana de 500 valores.

Considerou-se para a análise e estudo de importância dos parâmetros os seguintes modelos apresentados na tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros considerados nos modelos adotados para os cálculos

Modelo	Ultrassonografia Pulso Longitudinal (m/s)	Ultrassonografia Pulso Transversal (m/s)	Resistividade Elétrica Superficial (KΩcm)	Resistividade Elétrica Volumétrica (KΩcm)	Resistência à Compressão (MPa)
EQ	X	X			X
MD1	X	X			X
MD2	X	X	X		X
MD3	X	X	X	X	X

Fonte: Autores.

Os modelos MD1, MD2 e MD3 utilizaram o algoritmo XGBoost, já o modelo EQ utilizou as equações (1), (2) e (3).

3. Resultados e análises

A Tabela 4 apresenta os resultados médios obtidos com os ensaios físicos e não destrutivos realizados. Colocou-se como exemplo para o espaço amostral das argamassas de recuperação o resultado da argamassa A.

Tabela 4: Valores médios dos resultados obtidos para os parâmetros utilizados nos modelos

Amostra	μ UTS.V.P	μ UTS.V.S	μ RVT.SUP	μ RVT.VOL	μ RST
CPV	4323,60	2052,30	38,70	8,20	37,56
CPIII	4649,80	2151,20	318,87	107,20	33,16
CPII	4651,20	2169,20	175,33	56,70	29,50
AFck25	4355,50	2031,50	139,83	48,71	24,30
AFck35	4048,60	1982,00	64,58	19,98	35,95
AFck45	4262,80	2046,90	35,76	10,96	38,80
Argamassa A	4606,27	2268,56	53,60	53,60	80,40

Fonte: Autores.

Onde:

μ UTS.V.P = Velocidade ultrassônica longitudinal média;

μ UTS.V.S = Velocidade ultrassônica longitudinal média;

μ RVT SUP = Resistividade elétrica superficial média;

μ RVT VOL = Resistividade elétrica volumétrica média;

μ RST = Resistência à compressão axial média;

A Tabela 5 por sua vez apresenta os resultados médios obtidos para a resistência à compressão considerando os modelos desenvolvidos e as variações observada entre os resultados da resistência estimada e a real (equação 4).

$$Var = \frac{Valor\ real - Valor\ estimado}{Valor\ real} (\%) \quad (3)$$

Tabela 5: Valores médios obtidos para a resistência à compressão axial estimada

Amostra	μ RST	μ RST EQ	μ RST EQ VAR	μ RST MD1	μ RST MD1 VAR	μ RST MD2	μ RST MD2 VAR	μ RST MD3	μ RST MD3 VAR
CPV	37,56	23,92	36,3%	38,50	-2,5%	37,66	-0,3%	37,30	0,7%
CPIII	33,16	29,27	11,7%	38,20	-15,2%	36,38	-9,7%	32,58	1,7%
CPII	29,50	30,13	-2,1%	31,97	-8,4%	31,26	-6,0%	29,50	0,0%
AFck25	24,30	23,18	4,6%	24,72	-1,7%	24,56	-1,1%	24,22	0,3%
AFck35	35,95	20,43	43,2%	35,88	0,2%	36,01	-0,2%	35,85	0,3%
AFck45	38,80	23,51	39,4%	39,34	-1,4%	38,70	0,3%	38,30	1,3%
Argamassa A	80,40	34,93	56,5%	79,30	1,4%	78,86	1,9%	79,71	0,9%

Fonte: Autores.

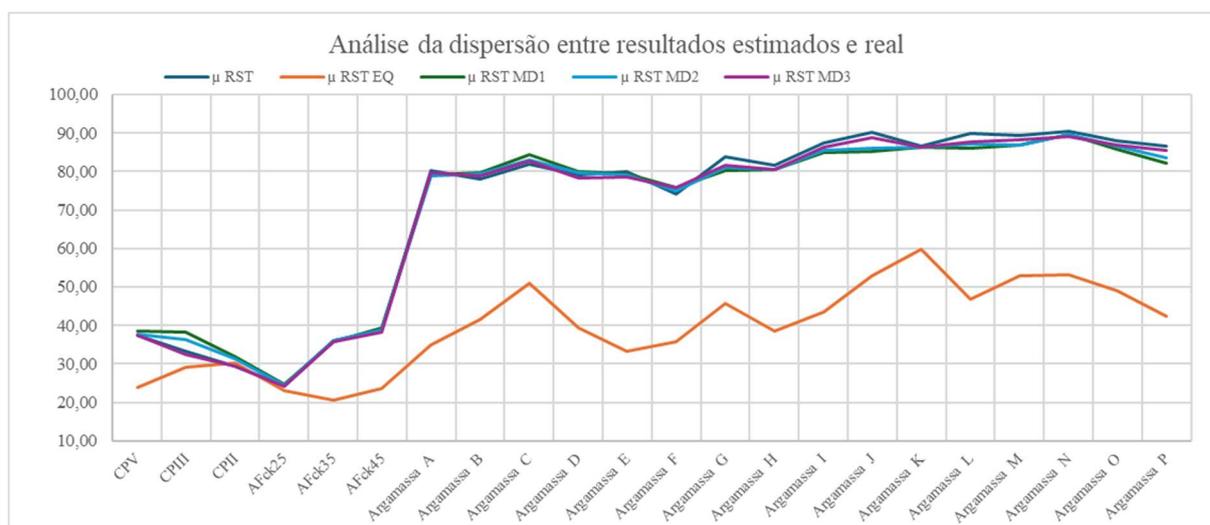


Figura 1: Análise da dispersão entre os modelos desenvolvidos. Fonte: elaborado pelos autores.

Conforme verifica-se na Tabela 5, os resultados médios da resistência à compressão obtido com o modelo equacional apresentaram as taxas de variação mais altas entre os modelos enquanto o modelo de algoritmo que considera todos os parâmetros obteve a menor variação. A Tabela 6 apresenta a análise estatística realizada para os modelos desenvolvidos

Tabela 6: Resultados estatísticos obtidos para os modelos de algoritmo desenvolvidos

Modelo utilizado	Coefficiente de determinação r^2	RMSE	SMAPE
MD1	0,875	8,27	7,01 %
MD2	0,89	8,16	6,97 %
MD3	0,978	3,08	3,61 %

Fonte: Autores.

O modelo MD3 obteve o menor valor para o erro médio percentual absoluto simétrico (SMAPE), o qual mede a diferença percentual entre os valores previstos e reais, levando em consideração a magnitude dos valores. Entretanto o MD3 é inviável em campo por utilizar do resultado da resistividade elétrica volumétrica.

A análise do MD2 confrontada com o MD1 na Tabela 6 permite inferir que o MD2 possui uma menor variância, respondendo melhor ao modelo desenvolvido. Entretanto a análise do erro quadrático médio (RMSE) dos modelos indica, baixa diferença entre os modelos de regressão.

4. Conclusões

A análise realizada apresentou modelos de algoritmos que a partir dos dados de ensaios não destrutivos, fornecem resultados com coeficiente de determinação de até 97%.

O modelo equacional matemático (MD EQ) apresentou uma discrepância entre os valores estimados e reais, apresentando taxas de variação para os resultados maiores que 50%. Já os modelos MD1 e MD2 que são possíveis de realização *in loco* na estrutura apresentaram taxas de variação menores que 20% e 10% respectivamente, apresentando um coeficiente de correlação acima de 0,85.

O modelo MD3 por sua vez apresentou um coeficiente de determinação de 0,97 com taxas de variação menores que 2%, respondendo corretamente à todas as amostras consideradas. O modelo MD3 se apresenta como o melhor modelo para se realizar laboratorialmente em corpos de prova, possibilitando a estimativa da resistência à compressão axial de modo preciso e assertivo.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à PI Engenharia Diagnóstica LTDA, à Torrent Engenharia e à Consultare-Labcon pelo apoio e suporte durante o desenvolvimento do trabalho.

Referências

- [1] Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT). NBR 12655:2015 – Concreto de Cimento Portland – Preparo, controle e recebimento P. Rio de Janeiro, 2015.
- [2] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 6118: Projeto de estrutura de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- [3] Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT). NBR 16697 – Cimento Portland – Requisitos . Rio de Janeiro, 2018.
- [6] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 5739 – Ensaio de compressão de corpos de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- [7] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 8802: Determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica . Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- [8] Asociación Española De Normalización Y Certificación. UNE 83988-2: durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo: determinación de la resistividad eléctrica: parte 2: método de las cuatro puntas o de Wenner. Genova, 2014a.
- [9] ASTM C1876-19 Standard Test Method For Bulk Electrical Resistivity Or Bulk Conductivity Of Concrete, 2019.
- [1] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO T 358- 15: Standard method of test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. Washington, 10p., 2015.
- [2] American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete; ASTM C597-02; ASTM:West Conshohocken, PA, USA, 2002.
- [4] Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT). NBR 15575 - Partes 1-6: Desempenho de Edifícios Habitacionais. Rio de Janeiro, 2013.
- [6] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 8522: Concreto - determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- [7] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

- [8] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 6118: Projeto de estrutura de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- [10] IS 13311-1 (1992): Method of Non-destructive testing of concrete, Part 1: Ultrasonic pulse velocity CED 2: Cement and Concrete.
- [11] Chambers, M.; Dinsmore, T. W. Advanced analytics methodologies: Driving business value with analytics. [S.l.]: Pearson Education, 2014.
- [12] Taffese, W. Z. e Espinosa-Leal, L. A machine learning method for predicting the chloride migration coefficient of concrete. Construction and Building Materials, Vol 348, 2022.

Requalificação Urbana: proposta de praça pública com regeneração de espaços verdes em Santana do Araguaia-PA

Urban Requalification: proposal for a public square with regeneration of green spaces in Santana do Araguaia-PA

Cláudia Queiroz de Vasconcelos, PhD.^a, UNIFESSPA/IEA/FATEC

claudia.vasconcelos@unifesspa.edu.br | ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3250-7813>

Naielly Eudira Almeida dos Santos, Graduanda em Engenharia Civil,
UNIFESSPA/IEA/FATEC | Nayalmeida210@unifesspa.edu.br

José Armando Martins Ferreira, Graduando em Engenharia Civil,
UNIFESSPA/IEA/FATEC | jose.armando@unifesspa.edu.br

Luana dos Santos Costa de Sousa Lima, Graduanda em Engenharia Civil,
UNIFESSPA/IEA/FATEC | luana.lima@unifesspa.edu.br

Wesley Dias Guedes, Graduando em Engenharia Civil, UNIFESSPA/IEA/FATEC |
wesley.guedes@unifesspa.edu.br

Resumo

Este artigo apresenta uma proposta de requalificação urbana que comporta uma solução de regeneração de espaços verdes em uma praça pública de Santana do Araguaia-PA. O objeto do estudo foi atender as demandas da comunidade local com relação a necessidade de revitalização do espaço público. A proposta de melhoria estrutural considerou a qualidade de vida, mediante uma consulta pública. O envolvimento da comunidade foi determinante nas tomadas de decisões para o desenvolvimento da proposta. A abordagem multidisciplinar permitiu o uso de aspectos da arquitetura e urbanismo, paisagismo, sustentabilidade e acessibilidade. Os resultados mostraram a importância da requalificação de equipamentos urbanos como um meio de melhorar a qualidade de vida, possibilitando a interação comunitária em espaços públicos mais atraentes e funcionais.

Palavras-chave: Requalificação Urbana; Praça pública; Regeneração; Espaços Verdes; Funcionalidade.

Abstract

This article presents a proposal for urban requalification that includes a solution for the regeneration of green spaces in a public square in Santana do Araguaia-PA. The object of the study was to meet the demands of the local community regarding the need to revitalize public space. The structural improvement proposal considered quality of life, through a public consultation. Community involvement was crucial in decision-making for the development of the proposal. The multidisciplinary approach addressed allowed the use of aspects of architecture and urbanism, landscaping, sustainability and accessibility. The results showed the importance of requalifying urban equipment as a means of improving the quality of life, enabling community interaction in more attractive and functional public spaces..

Keywords: Urban requalification; Public square; Regeneration; Green spaces; Functionality.

1. Introdução

O urbanismo abrange a noção de planejamento regional que comporta diferentes interfaces com o viés multidisciplinar. O surgimento no século XIX designou uma realidade específica que se apresenta como uma ciência que estuda a diversidade das demandas da cidade. O termo urbanismo passou a ser relacionado em tudo que diz respeito a cidade como, obras públicas, morfologia urbana, planos urbanos, práticas sociais e pensamento urbano, legislação e direito relativo à cidade, conforme Silva, Bueno e Madureira [1].

Este estudo descreve o processo de desenvolvimento de um projeto de intervenção voltado para a requalificação urbana, que visa a melhoria da infraestrutura de uma área ociosa no centro da cidade de Santana do Araguaia-PA. Esse espaço verde livre, desertificado, pode possibilitar a implantação de uma praça pública, ou seja, a renovação ou a regeneração urbana da cidade. O objeto deste estudo analisar as complexas dimensões conceituais, indo além da estética, para a proposição da requalificação do equipamento urbano, com impacto positivo e transformador na rotina da comunidade.

A pesquisa destaca a importância do aprimoramento de projetos mais conscientes que possam contemplar abordagem multidisciplinar para a possível viabilidade da qualidade de vida dos residentes locais. A requalificação de equipamentos urbanos busca o fortalecimento de relações comunitárias desde a fase de concepção de projeto de espaços públicos, com atributos de usabilidade, funcionalidade, acessibilidade, paisagismo, ambiência e identidade de lugar.

O envolvimento ativo da comunidade no processo de tomada de decisões relativo ao projeto de requalificação do espaço, ressaltou prioridades de usos que foi essencial para o sucesso e a sustentabilidade desses esforços. Os resultados não apenas refletem melhorias tangíveis na infraestrutura e no uso do espaço, mas também revelam uma revitalização da cultura local e um fortalecimento do senso de pertencimento à cidade.

2. Requalificação Urbana e a regeneração de espaços verdes

A requalificação urbana é um processo dinâmico e multifacetado que visa transformar as áreas urbanas para enfrentar os desafios contemporâneos, promovendo uma convivência mais sustentável, inclusiva e acolhedora. O conceito de requalificação urbana, como uma forma de intervenção nos espaços públicos urbanos, emergiu nas terminologias do urbanismo no final da década de 1990, um período caracterizado por contradições ideológicas. De um lado, observa-se transformações no tecido urbano por meio de projetos de renovação urbana, enquanto, no extremo oposto, surgiu a necessidade de preservar os patrimônios históricos, ambientais e sociais das cidades, conforme Lima [2].

O espaço público, em teoria, é um campo de estudo que se concentra na compreensão e análise dos espaços urbanos abertos e acessíveis ao público, nos quais ocorrem as interações sociais. Segundo Habermas [3], no contexto da revitalização de praças públicas, em teoria deve-se enfatizar a importância de criar ambientes inclusivos que promovam a participação ativa da comunidade. O equipamento urbano, espaço público, permite a interação democrática e o diálogo entre os cidadãos diante a morfologia urbana.

Para Arendt [4], analogamente à antiga ágora grega, a teoria sugere que as praças públicas contemporâneas devem servir como locais de debate, expressão cultural e interação social. Na revitalização das praças deve-se buscar a [re]criação de espaços que possam promover encontros e experiências de acolhimento e inclusão de todos os usuários em potencial.

A teoria do espaço público ressalta a importância de criar espaços onde todos os cidadãos possam participar de modo igualitário. Segundo Young [5], para a revitalização de praças deve-se apoiar em teoria que sugere estratégias para envolver a comunidade no processo de tomada de decisões, promovendo uma esfera pública mais acessível e democrática.

A revitalização de praças públicas, à luz da teoria do espaço público, busca promover o uso plural desses espaços, integrando diversas atividades e expressões culturais. Para Sennett [6], a criação de ambientes que acomodem eventos culturais, esportivos e de lazer fortalece a identidade e coesão da comunidade. A revitalização desses espaços vai além de melhorias da infraestrutura, pois busca-se um investimento na qualidade de vida, na coesão social e no desenvolvimento sustentável das comunidades. Ao dispor de ambientes atrativos e funcionais, a revitalização contribui para a construção de cidades mais vibrantes, saudáveis e inclusivas.

Dessa maneira, a revitalização extrapola as simples melhorias visuais, pois envolve o redesenho cuidadoso dos espaços, considerando aspectos, como por exemplo, acessibilidade, sustentabilidade, segurança, paisagismo e inclusão. Ao buscar a participação ativa da comunidade local, o projeto visa atender às necessidades específicas de cada área, criando ambientes que refletem a identidade local e cultural, que permitem a valorização do senso de pertencimento.

Para Gomes [7] o investimento na criação e manutenção de espaços públicos, com qualidade, em bairros, que comportem comunidade de baixa renda, pode ser crucial para o fortalecimento coletivo, tornando-os mais resilientes, acolhedores e inclusivos. O equipamento urbano trata-se de um elemento fundamental que pode possibilitar melhorias na qualidade de vida das pessoas, podendo ter um impacto positivo na dinâmica de seu entorno imediato e conseqüentemente na cidade.

Vasconcelos e Librelotto [8] em “Impacto Social: Requalificação de praça em Santana do Araguaia” evidenciam a teoria do espaço público quando realizam procedimentos de atividades de campo com os moradores, para delimitação de usos, coletivo e comunitário, para que o equipamento urbano suprisse as suas reais demandas.

Gomes [7] também revela em seu estudo de caso, consultas e observações *in loco*, em Barrada, bairro no município de Carregado em Lisboa, como elemento estratégico para a fundamentação da viabilidade de espaço público, enquanto elemento de união e conexão, possibilitando a oportunidade de novas vivências e dinâmicas de uso social.

3. Procedimentos Metodológicos

Para a requalificação do equipamento urbano foi adotado procedimentos para estudo de viabilidade para concepção do projeto de uma praça pública num espaço livre e verde. O processo começou com visitas técnicas ao local, a fim de estudar o espaço e identificar suas características e necessidades, mediante levantamento dimensional. Durante as atividades de campo foram feitas coletas de dados e imagens para documentar o estado atual da área, vestígio de usos, mediante observação para análise de suas características.

A pesquisa foi conduzida junto à comunidade por meio do Google *Forms*, buscando compreender o nível de satisfação das pessoas com relação ao ambiente e identificar suas preferências em relação aos equipamentos desejados para inclusão no projeto da praça. Essa coleta de dados permitiu uma abordagem inclusiva, proporcionando a participação ativa da comunidade santanense.

A proposta foi desenvolvida em equipe considerando a modelagem digital para facilitar a compreensão da comunidade. A versão final do projeto foi apresentada à comunidade estudantil do ensino médio, de uma escola pública. A demanda principal foi qualificar o vazio urbano, mediante eixos norteadores, como por exemplo, paisagismo, regeneração de espaço livre, impacto ambiental, funcionalidade, plano de arborização e acessibilidade.

4. Resultados

O projeto visou dispor da essência de praças, como elemento urbano importante para a comunidade, em questões físicas, mentais e sociais. A infraestrutura das praças pode proporcionar espaços abertos que favorecem a prática de atividades físicas e de lazer, promovendo um estilo de vida mais saudável. Além disso, esses ambientes oferecem refúgio e contato com a natureza, contribuindo para o bem-estar dos indivíduos e o acolhimento dos usuários no cotidiano da cidade.

No Quadro 1, as soluções propostas buscam amenizar problemas com relação a usabilidade e acessibilidade, proporcionando uma ambiência convidativa e paisagismo mais acolhedor. A vista da prefeitura municipal consta sem arborização, o que dificulta o uso desse espaço livre na maior parte do dia, pois não se tem áreas sombreadas, cobertas ou semicobertas, para possibilitar a proteção da incidência solar direta. A vista da câmara municipal, apesar de possuir arborização, ainda possui baixo desempenho no quesito de paisagismo, funcionalidade e acessibilidade, que implica em um ambiente pouco convidativo.

Quadro 1: Síntese da área de estudo para o projeto da praça pública.

Descrição	Espaços Livres	Modelagem 3D do Projeto
Vista da Prefeitura Municipal		
Vista da Câmara Municipal		
Área de Estudo		

Fonte: Autores.

A consulta pública realizada mediante uma pesquisa *online*, junto aos usuários, norteou as tomadas de decisão projetual, priorizando frentes de trabalhos e funcionalidades para desenvolvimento da proposta de requalificação urbana, que buscou responder aos anseios da comunidade. A ferramenta do uso de formulário digital determinou diretrizes necessárias para a regeneração de espaços verdes da praça, conforme mostrado na Figura 1.



Figura 1: Regeneração de espaços verdes da praça. Fonte: Elaborado pelos autores.

No âmbito social, a proposta da praça atendeu ao quesito de funcionar como ponto de encontro, com atributos para o fomento e estímulo à interação e fortalecimento de laços comunitários. A geometria espacial passou a comportar espaços abertos, cobertos e semicobertos, com usos coletivos e públicos. O traçado desse equipamento urbano também pode comportar eventos culturais, manifestações artísticas e atividades recreativas.

A praça pública foi estruturada com elementos básicos essenciais para a comunidade, proporcionando um espaço de encontro e interação social e um contato direto com a natureza. A Figura 2 mostra a vista superior do projeto com e sem cobertura, onde é possível observar a distribuição das árvores no terreno.

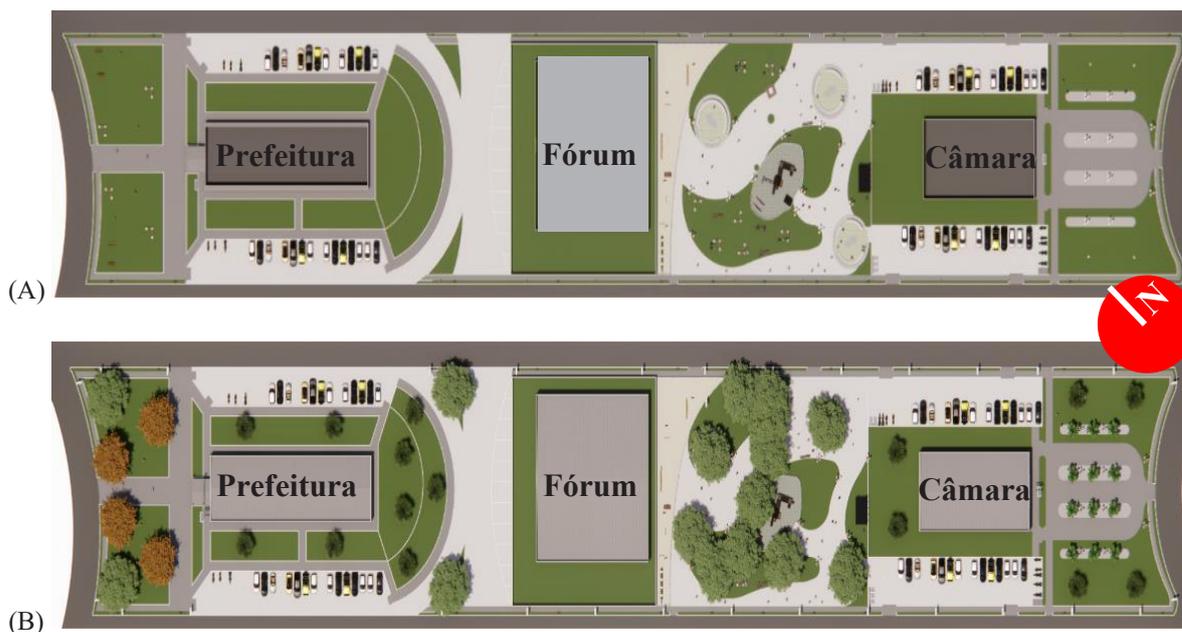


Figura 2: Vista superior da proposta: (A) Vista superior sem cobertura; (B) Vista superior com cobertura. Fonte: Elaborado pelos autores.

A dinâmica morfológica da proposta da praça pública, vai além do atributo de projeto em si, pois permitiu valorizar a coesão social com a identidade de lugar, que considerou o sentimento e a sensação de pertencimento dos participantes da consulta pública. O impacto social positivo compreende a regeneração de área verde da área central, por constar desertificada, com baixo índice de arborização, conforme mostrado na Figura 3.



Figura 3: Área do estudo sobre a requalificação urbana. Fonte: Google Maps com modificações pelos autores.

O atributo da usabilidade foi uma preocupação constante da proposta tendo em vista a condição climática de Santana do Araguaia-PA. Essa condicionante permitiu a concepção de um projeto consciente e pautado no conforto térmico, diretamente relacionado a satisfação possível do usuário determinada pelos fatores de temperatura do ar, umidade, velocidade do ar, temperaturas radiantes e uso da vegetação, priorizando árvores de grande porte para amenizar a incidência solar a as altas temperaturas.

A pesquisa que fundamentou a proposição da requalificação da praça buscou priorizar áreas sombreadas para que permitam o uso eficiente desse espaço público, de modo a qualificar o ambiente construído. O plano de arborização considerou espécies locais que suportam as peculiaridades climáticas da região sul do Pará. A organicidade do traçado de canteiros, jardins de chuva, especificação de pisos drenantes, não reduziu as áreas permeáveis, apenas possibilitou melhorias de infraestrutura e a valorização espacial.

A Figura 4 apresenta uma perspectiva de uma vista do projeto da praça, que destaca funcionalidades, conforme a demanda dos participantes da pesquisa, tornando a praça atraente e convidativa. A regeneração de espaços verdes permitiu uma arborização voltada ao atributo essencial do conforto térmico, devido as condições climáticas regionais. Essa disposição de grandes áreas sombreadas permite o uso do espaço público apesar do calor intenso da cidade, para atividades recreativas, esportivas e de lazer, de modo seguro e confortável.



Figura 4: Perspectiva do projeto da praça. Fonte: Elaborado pelos autores.

O projeto da praça foi elaborado para mostrar a importância do ambiente urbano concebido a partir de uma demanda real com uma interatividade junto a comunidade. O papel fundamental da cidade verde é consolidar diretrizes mais sustentáveis, que também podem contribuir de modo efetivo para o cotidiano do município. Desse modo, ao integrar as áreas verdes na praça buscou-se a promoção da saúde ambiental e a mitigação do impacto negativo nas áreas urbanas.

5. Análises dos Resultados

A concepção do projeto da praça não apenas deu uso, como transformou um espaço livre, ocioso, em um equipamento urbano vibrante. A nova percepção da área de estudo, reforçou sua importância no contexto local, mediante a qualificação da infraestrutura existente. O projeto enfatizou a integração de espaços abertos, coberto e semicobertos para permitir a funcionalidade de convívio, socialização e inclusão, com aspecto convidativo e acolhedor para a interação em ambiente ao ar livre.

No Quadro 2 pode-se observar a opinião e as necessidades dos residentes, do entorno imediato, da área de intervenção. O projeto foi fundamentado a partir da pesquisa, mediante consulta pública, alinhando as expectativas e aspirações da comunidade local. Essa abordagem participativa contribuiu para o processo criativo do desenvolvimento da proposta, valorizando as perspectivas individuais, o senso de pertencimento e a percepção colaborativa. O resultado final do projeto buscou responder as necessidades e os desejos dos usuários.

Quadro 2: Síntese da pesquisa realizada com a comunidade.

SATISFAÇÃO DOS USUÁRIOS				
Descrição	Muito Satisfeito	Satisfeito	Pouco Satisfeito	Nada Satisfeito
Situação Atual	3,7%	7,4%	33,3%	55,6%

Fonte: Autores.

A pesquisa foi conduzida a partir de dados coletados por meio de um formulário direcionado à comunidade, que revelou necessidades e aspirações da população local. A partir das respostas obtidas, foi possível identificar demandas específicas, como a carência de espaços de convívio e lazer próximos aos prédios governamentais, Prefeitura, Fórum e Câmara. Essa consulta pública determinou as prioridades e as premissas de projeto, conforme mostrado na Figura 5.

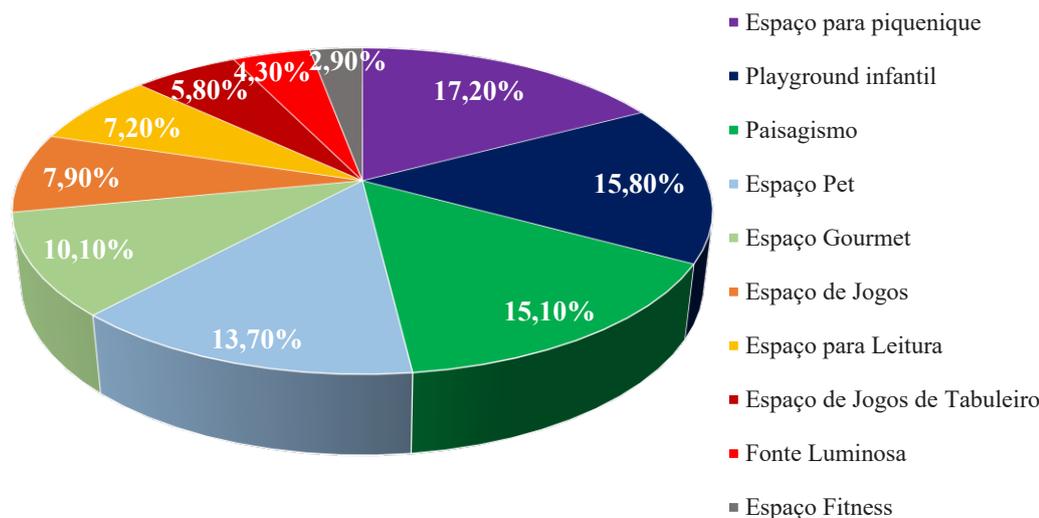


Figura 5: Pesquisa de satisfação junto à comunidade. Fonte: Elaborado pelos autores.

A requalificação da praça pública permitiu atender a demanda da comunidade a partir da conexão da malha urbana com a melhoria funcional de infraestrutura e da paisagem. A coleta de dados, a caracterização do local, os estudos de caso e o estudo conceitual permitiu o desenvolvimento da proposta. A modelagem computacional 3D do projeto possibilitou a representação gráfica da proposta. A análise da diversidade comportou a disposição formal, a geometria do traçado, o mobiliário urbano, o paisagismo, a funcionalidade, a acessibilidade, a sustentabilidade e a segurança. O espaço livre degradado foi transformado considerando a regeneração de espaços verdes. O projeto permitiu um impacto positivo nas intervenções, que se fundamentou em diferentes aspectos urbanísticos e no processo colaborativo. Essa participação foi essencial para delimitação de prioridades das demandas e de critérios que viabilizassem efetivamente a usabilidade desse equipamento urbano, observando ter de modo eficaz a condição de uso, considerando os elementos climáticos regionais.

6. Conclusão

O projeto da praça foi elaborado a partir de estudos preliminares, estudos de caso, análises de condições climáticas e diálogo com a comunidade. A conexão de elementos essenciais do ambiente e as necessidades reais da população local permitiu uma proposta de intervenção pautada na regeneração de espaços verdes, por vezes, desertificados, no quesito do paisagismo e da arborização eficiente. A modelagem computacional permitiu a facilitação da compreensão do projeto de requalificação urbana.

O processo de elaboração do projeto comportou demandas reais, conscientes das limitações para o fortalecimento da identidade de lugar. A abordagem multidisciplinar permitiu estudos conceituais a apoiaram as tomadas de decisões de projeto. O contexto da sustentabilidade ficou focado nos seguintes critérios: ambiente urbano mais resiliente, dinâmico e centrado nas demandas de usuários da área de intervenção. Deste modo, o estudo permitiu um passo significativo em direção às premissas de projetos com ênfase na eficiência, consciência ambiental e processo colaborativo. A proposta buscou estratégias para possibilitar a qualidade de vida e o bem estar das pessoas.

A área de estudo foi considerada como espaço livre, em desuso, ou com baixo desempenho relativo a um elemento estruturante de equipamento urbano. A proposta buscou a regeneração desse espaço mediante um plano de arborização com espécies regionais, para possibilitar o seu

uso e a sua localização estratégica, integrada ao quarteirão que abriga instituições dos três poderes, executivo, a Prefeitura Municipal, legislativo, a Câmara Municipal, e judiciário, o Fórum.

A pesquisa proporcionou a concepção do projeto de praça pública fundamentado em diretrizes da requalificação urbana. A proposta permitiu melhorias de elementos estruturantes urbanos, para a viabilidade da regeneração de espaços verdes. O impacto positivo compreende potencializar a possibilidade de uma renovação da infraestrutura em prol do bem estar e a qualidade de vida da população, em detrimento do atributo sociocultural.

Referências

- [1] SILVA, Renata Vicentin; BUENO, Adriano Rafael Escher; MADUREIRA, Eduardo Miguel Prata. **O surgimento do Urbanismo**: planejamento urbano. Anais do 14º Encontro Científico Cultural Interinstitucional, [s. l.], 2016. Disponível em: <https://www.fag.edu.br/novo/5b8d826164cb4.pdf>. Acesso em: 01 fev. 2024.
- [2] LIMA, Aryane. Renovação, revitalização ou requalificação urbana? **Projeto Batente**. Fortaleza-CE: Urbanismo, 2017. Disponível em: <https://projetobatente.com.br/renovacao-revitalizacao-ou-requalificacao-urbana/>. Acesso em: 10 jan. 2024.
- [3] HABERMAS, Jürgen. **Mudança estrutural da esfera pública**: investigações quanto a uma categoria da sociedade burguesa. Tradução: Flávio R. Kothe. Rio de Janeiro: Tempo Brasileiro, 2003. Disponível em: <https://shorturl.at/qsuEU>. Acesso em: 01 mar. 2024.
- [4] ARENDT, Hannah. **A Condição Humana**. Tr. Roberto Raposo. 10ª ed. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 2012. Disponível em: <https://shorturl.at/k1167>. Acesso em: 19 jan. 2024. Acesso em: 10 jan. 2024.
- [5] YOUNG, Iris Marion. **Inclusão e Democracia**. Reino Unido: Universidade de Oxford, 2000. Disponível em: <https://shorturl.at/bP256>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- [6] SENNETT, Richard. **O Artífice**. Tr. Clóvis Marques. 5ª ed. Rio de Janeiro: Record, 2019.
- [7] GOMES, José Carlos Ribeiro Ferrão. **Requalificação de Subúrbios Habitacionais**: O espaço público como elemento de ligação no Carregado. 2019. 156 f. Projeto Final de Mestrado (Mestrado em Arquitetura e Especialização em Urbanismo) – Universidade de Lisboa, FAU, 2019. Disponível em: <https://shorturl.at/qFPSY>. Acesso em: 05 fev. 2024.
- [8] VASCONCELOS, Cláudia; LIBRELOTTO, Lisiane Ilha. Impacto Social: requalificação de praça em Santana do Araguaia/PA. **IMPACT projects**, vol. 1, n. 1, p. 31-42, 2022. Disponível em: <https://periodicos.unifesspa.edu.br/index.php/impactprojects/article/view/1964/887>. Acesso em 15 fev. 2024.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Unifesspa/Propit, Unifesspa/Proeg, Unifesspa/Proex e Fapespa, que disponibilizaram bolsas aos discentes mediante os seguintes editais: PROPIT N. 09/2023 - 2024 PIBIC/FAPESPA, PROEG N. 10/2023 - PADI 2023 e PROEX N. 13/2023 PIBEX PROJETOS.

Análise do gerenciamento de resíduos da construção civil: Um estudo de caso em Belém do Pará

Analysis of construction waste management: A case study in Belém do Pará

Ádria Rafaella Modesto Reis, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará

adriarafaella@gmail.com

Samuel Oliveira de Queiroz, Grupo de Pesquisa em Materiais de Construção, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará

samuelloliver1010@gmail.com

Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro, Grupo de Pesquisa em Materiais de Construção, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará

lupcordeiroo@gmail.com

Mariana Domingues von Paumgarten, Grupo de Pesquisa em Materiais de Construção, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará

marianadvp@ufpa.br

Resumo

O presente artigo objetivou avaliar os indicadores de gerenciamento de resíduos da construção civil na cidade de Belém do Pará e, assim, compará-los com os coeficientes obtidos na literatura. A metodologia da pesquisa deu-se através da aplicação de um questionário em obras vistoriadas na capital paraense, onde obteve-se informações referentes ao gerenciamento e o volume dos resíduos produzidos. Os resultados obtidos apresentaram-se inferiores aos que foram identificados na literatura, concluindo-se que, possivelmente, a cidade de Belém não avançou nas obrigatoriedades das legislações que se referem ao gerenciamento adequado dos resíduos de construção.

Palavras-chave: Resíduos da construção civil; Gerenciamento de resíduos; Indicadores.

Abstract

This article aimed to evaluate construction waste management indicators in the city of Belém do Pará and, thus, compare them with the coefficients obtained in the literature. The research methodology was carried out through the application of a questionnaire in inspected works in the capital of Pará, where information regarding the management and volume of waste produced was obtained. The results obtained were lower than those identified in the literature, concluding that, possibly, the city of Belém did not advance in the mandatory legislation that refers to the adequate management of construction waste.

Keywords: *Construction waste; Waste management; Indicator.*

1. Introdução

Os Resíduos de Construção Civil (RCC) e os Resíduos de Construção e Demolição (RCD) são suscitados nas atividades de construção, reforma ou demolição e compostos por um conjunto de materiais, tais quais: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, madeiras e compensados, argamassa, gesso, entre outros (CONAMA, 2002). Segundo a NBR 15114 (ABNT, 2004), resíduos de construções são classificados como Classe A, sendo estes provenientes de:

- a) construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplenagem;
- b) construção, demolição, reforma e reparos de edificações (componentes cerâmicos, tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento, entre outros), argamassa e concreto;
- c) processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto, produzidos em canteiros de obras.

Desde 2002, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) orientava o gerenciamento adequado dos RCC e RCD, através da reciclagem e reutilização. Além disso, o CONAMA estabeleceu procedimentos, diretrizes e critérios para a geração destes resíduos, buscando assim, nortear as tratativas para que fossem minimizados os impactos ambientais negativos. Desse modo, o órgão exigiu uma reorganização da sociedade, no que diz respeito ao descarte de RCC e RCD.

No entanto, a partir da Lei 12305 (Brasil, 2010) tornou-se obrigatório o adequado gerenciamento dos RCC e RCD. Sendo assim, tanto o poder público quanto as empresas de construção, tornaram-se responsáveis por desenvolver posturas sustentáveis no tratamento de seus resíduos. Desse modo, as empresas privadas de construção, que são amplas fomentadoras de resíduos, devem desenvolver planos exclusivos para o tratamento adequado dos entulhos de construção e demolição. Enquanto isso, o poder público deve apresentar uma rede de coleta e destinação ambientalmente correta para os pequenos geradores, responsáveis por reformas e autoconstruções, e, incapazes de aplicar o autogerenciamento (Angulo et al., 2011). Sendo assim, o tratamento de resíduos alcançou dimensões políticas, ambientais, econômicas, culturais, sociais, e, além disso, sinalizou a adoção, por parte do governo, de uma perspectiva de gerenciamento integrado e participativo (Oliveira, 2012).

A concepção da Política Nacional de Resíduos Sólidos é a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento destes resíduos, assim como, a destinação final ambientalmente adequada dos rejeitos – resíduos sólidos que não podem mais ser reaproveitados. Desse modo, o grande objetivo dessa política é a proteção da saúde pública e a qualidade ambiental.

Países da Europa e Japão são exemplos de reconstrução através do reaproveitamento de RCC. Além da escassez de materiais, que é um fator que obriga estes países a reutilizarem resíduos, há o fator do pós-guerra, que fez com que países europeus reutilizassem destroços de suas edificações para se reerguerem, assim como, as catástrofes naturais, que fazem com que o Japão ressurgisse também reaproveitando resíduos (Pereira e Vieira, 2013). No Brasil, cidades como Belo Horizonte, Rio de Janeiro, São Paulo, Goiânia, Uberlândia, Salvador e Brasília, realizaram experiências em pavimentação com RCC, chegando à conclusão de que estes reaproveitamentos apresentam condições favoráveis desde que sejam adequadamente reciclados (Pereira e Vieira, 2013).

No município de Belém do Pará, em consonância com a Lei 12305 (Brasil, 2010), existe a Lei Municipal 8899 (Belém, 2011), sendo a responsável por reger a Política de Resíduos Sólidos na capital do estado do Pará. Esta define que os geradores de resíduos devem obedecer aos princípios e diretrizes do Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS) para um adequado tratamento destes resíduos. Portanto, segundo a Lei Municipal 8899 (Belém, 2011), o PGRS busca minimizar a geração de resíduos, adequar a segregação, controlar e reduzir riscos ao meio ambiente e assegurar o correto manuseio e disposição final.

Entretanto, apesar das iniciativas de reuso serem levantadas no Brasil, a situação ainda é insatisfatória, pois não há atuação das políticas públicas para uma melhor fiscalização dos empreendimentos, assim como, na educação das empresas quanto ao importante exercício do gerenciamento adequado de resíduos. Segundo Nascimento (2016), é possível notar que, em virtude da insuficiente fiscalização dos órgãos ambientais competentes, junto às empresas de construção civil, a quantificação e gerenciamento de resíduos de construção civil são precários no Brasil.

Além disso, segundo Nascimento (2016), o RCC é um notável problema nos municípios brasileiros, pois a deposição aleatória destes entulhos pode acarretar problemas de nocividade ao meio ambiente, à saúde pública e na poluição visual. Contudo, pode-se afirmar que o cumprimento da legislação acarretaria grandes benefícios às construtoras, à sociedade em geral, assim como, ao meio ambiente. O bom gerenciamento e o tratamento dos resíduos de construção alavancariam o desenvolvimento urbano, poupando o meio ambiente de muitos impactos ambientais negativos oriundos do grande volume de entulhos nas cidades e o despejo irregular destes. Além disso, geraria economia para as empresas, através de um sistema eficaz de seleção e reaproveitamento de resíduos.

Neste contexto, o presente estudo objetiva avaliar os índices de gerenciamento de resíduos da construção civil nas obras de Belém do Pará. Posteriormente, com a obtenção destes coeficientes, será possível compara-los com os dispostos na literatura.

2. Procedimentos metodológicos

Na primeira etapa deste trabalho, realizou-se o levantamento bibliográfico das informações relacionadas ao gerenciamento e quantificação de RCC. Sendo que, a partir disso, tornou-se possível estabelecer parâmetros de referências dos índices de geração de resíduos.

Na segunda etapa, ocorrida entre os anos de 2015 e 2016, aplicou-se uma pesquisa de campo em obras da Região Metropolitana de Belém (RMB). Nesta fase, fez-se uso do questionário (Tabela 1) proposto por Nascimento (2016), com perguntas referentes ao tipo de obra, volume de resíduos gerados, área, custo com resíduos e organização gerencial do canteiro de obras. Vale salientar que, somente três, das dez empresas convidadas a participar da pesquisa, aceitaram responder o questionário e permitiram a vistoria, desse modo, o estudo limitou-se a quatro prédios residenciais de padrões popular e médio.

Tabela 1: Questionário de entrevistas aos gestores de obras.

Dados do empreendimento
Qual o nome do empreendimento?
Em qual classificação esse empreendimento pode ser enquadrado?
Qual a quantidade de pavimentos do empreendimento?
Qual a quantidade de pavimentos tipo do empreendimento?
Qual a área construída do pavimento tipo?
Qual a área construída total do empreendimento?
Em qual padrão construtivo o empreendimento se enquadra?
Dados de gerenciamento de resíduos
Qual o volume total de resíduos gerados?
Quanto a empresa coletora de resíduos cobra por container coletado?
Qual o volume do container?
Qual o prazo total da obra?
Ocorre separação dos resíduos por classificação?
Qual o volume produzido por classificação de resíduos?
A obra possui sistema de seleção e reaproveitamento de resíduos?
Dados da Produção
Qual o sistema construtivo adotado?
Qual o nível de organização do canteiro de obras?
Contato do entrevistado.

Fonte: Nascimento (2016).

Na terceira etapa, os dados coletados nas visitas técnicas foram tabulados e analisados de forma a auxiliar na avaliação dos indicadores de resíduos. É importante salientar que as obras estavam em etapas construtivas distintas, por conta disso, realizou-se a análise das obras de forma individual. Desse modo, calculou-se o Índice de Geração de Resíduos (IGR) através da equação (1) proposta por Picchi (1993).

$$IGR (m^3/m^2) = \frac{\text{Volume de resíduos gerados } (m^3)}{\text{Área total construída } (m^2)} \quad (1)$$

Por fim, na etapa quatro, realizou-se a análise e discussão dos resultados. Desse modo, tornou-se possível analisar os indicadores de gerenciamento de resíduos nas obras avaliadas.

3. Análise dos resultados

Na Tabela 2, estão dispostas as informações gerais dos empreendimentos. Destaca-se que, nas obras analisadas, observou-se o sistema construtivo intermediário em comum, dentre os quais pode-se destacar: elementos pré-moldados, corte e dobra de aço industrializado, argamassas industrializadas, execução de alvenaria e alguns equipamentos de transportes horizontal e vertical.

Tabela 2: Informações gerais dos empreendimentos.

Obra	Área total construída (m ²)	Reaproveitamento de resíduos	Separação de resíduos por tipo
01	3.8745,22	Sim	Não
02	36.014,87	Não	Não
03	13.192,25	Não	Não
04	9.862,08	Não	Não

Fonte: elaborado pelos autores.

3.1. Análise do gerenciamento dos resíduos gerados pelos empreendimentos

A partir dos resultados obtidos nos questionários e na avaliação das obras nas vistorias, tornou-se possível realizar uma análise individual de cada empreendimento. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Análise individual dos empreendimentos.

Obra	Data da visita	Descrição da obra	Tempo de obra (meses)	Vol. de resíduo mensal (m ³)	Custo com descarte de resíduos mensal (R\$)
01	dez/15	Residencial, padrão popular, 6 torres de 10 pav.	46	680,00	24480,00
02	jan/16	Residencial, padrão médio, 5 torres de 13 pav.	31	135,00	5400,00
03	fev/16	Residencial, padrão médio, 1 torre de 24 pav.	16	28,00	880,00
04	fev/16	Residencial, padrão médio, 1 torre de 23 pav.	40	75,00	2400,00

Fonte: elaborado pelos autores.

Na Figura 01, estão dispostos o gráfico do tempo de execução estimada de cada obra [Figura 01(a)] e o gráfico da estimativa mensal do volume de resíduos gerados nas edificações vistoriadas [Figura 01(a)]. É importante evidenciar que, a discrepância dos resultados entre as obras, dar-se-á devido alguns aspectos construtivos, dentre eles, destaca-se: áreas construídas totais distintas, fases construtivas diferentes, falta de precisão nas respostas fornecidas pelos gestores, que, na maioria das vezes, possuíam um conhecimento limitado sobre a quantificação real dos resíduos gerados. De maneira geral, a Figura 01(a) mostra que, quanto mais próximo da conclusão do edifício, maior o consumo de resíduos gerados.

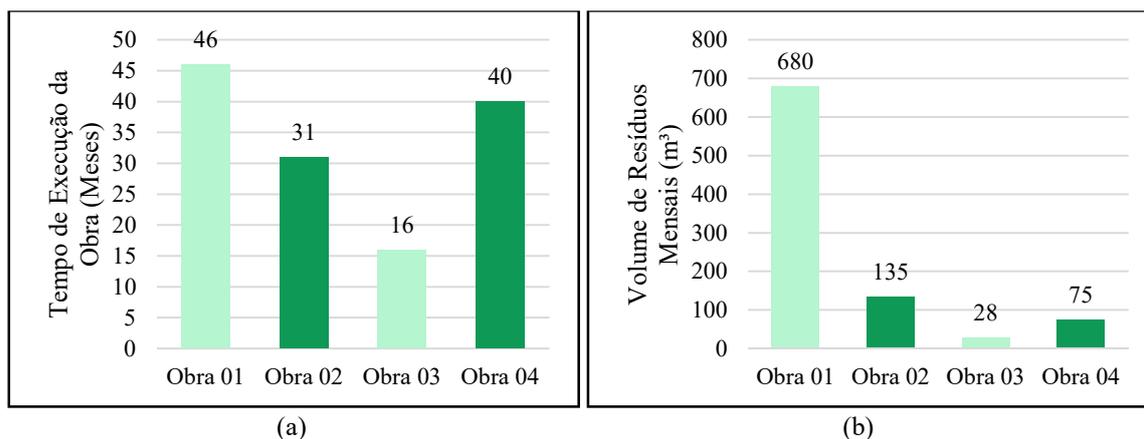


Figura 01: (a) Duração da execução da obra até o momento da pesquisa; (b) Volume médio de resíduos gerados mensalmente. Fonte: elaborado pelos autores.

É importante destacar que, a Obra 01, apresenta o maior volume de resíduos devido a sua área construída ser superior as demais, conforme apresentado na Figura 02(a). Além disso, na Obra 01, as torres foram construídas de forma simultânea e, conseqüentemente, gerando um maior volume de resíduos. Entretanto, a Obra 02, apesar da área construída ser aproximada à da Obra 01, o volume de resíduos mensais é inferior; tal divergência dar-se-á devido os blocos da Obra 02 serem construídos em tempos distintos, gerando um volume de resíduos inferior.

Como esperado, é possível observar que, em grande parte das obras avaliadas, o custo mensal é proporcional ao volume de resíduos, assim como, o volume de resíduos é proporcional à área construída. Entretanto, a Obra 03 possui área construída superior em relação a Obra 04 e, mesmo assim, a Obra 04 possui um custo médio mensal superior ao da Obra 03. Desse modo, confirma-se a constatação feita por Cruz e Cruz (2009) de que as fases finais são as mais geradoras de resíduos.

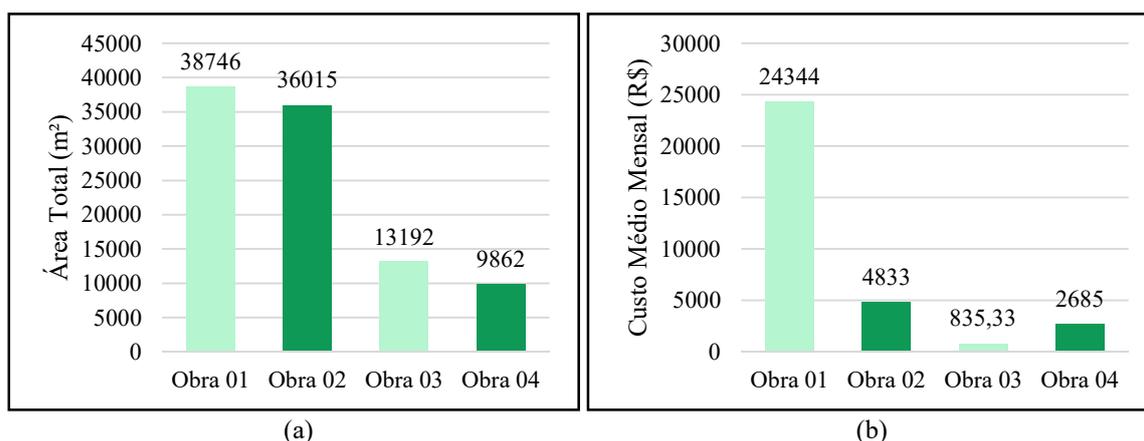


Figura 02: (a) Área total construída; (b) Custo com condicionamento e transporte de resíduos. Fonte: elaborado pelos autores.

Salienta-se ainda que o custo com transportes de containers também é diferenciado em cada uma das obras. Tendo em vista que, cada obra, terceiriza o serviço com uma empresa específica e os valores de transportes de containers, assim como, o volume máximo que cada container suporta variam em cada empreendimento. Por este motivo, adotou-se neste trabalho um valor médio aritmético de R\$ 35,80 por metro cúbico, para determinar o custo médio mensal da Figura 02(b).

3.2. Índice de produção de resíduos

Tendo em vista os dados obtidos, pôde-se realizar uma média mensal dos resíduos gerados, para assim, serem analisados e comparados com os valores obtidos na literatura. Desse modo, através do IGR que relaciona o volume total de resíduos e a área total construída das obras vistoriadas, obteve-se os resultados mostrados na Figura 03. Vale ainda salientar que, a Figura 03, também dispõe dos IGRs estimados na literatura, onde Picchi (1993) verificou que a engenharia brasileira da época produzia 0,094 metros cúbicos de resíduos por área construída e, Dias (2013), vinte anos depois, aferiu um índice médio para o Brasil de 0,128 m³/m²; além disso, Katz e Baum (2010), alcançaram um índice estimado de 0,200 m³/m² em Israel.

É importante evidenciar que, os métodos de gerenciamento de resíduos no Brasil na época de Picchi (1993) e de Dias (2013), são bem diferenciados. Visto que as exigências de um gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos de obras começaram a ser implementadas a partir das cobranças legislativas de 2010. Desse modo, o resultado apontado por Dias (2013), materializou-se após uma mudança no trato de gerenciar e quantificar os resíduos oriundos de atividades da construção civil. Apesar de todas as dificuldades, as empresas pesquisadas por Dias (2013) manifestavam o interesse em prestar um serviço ecoeficiente.

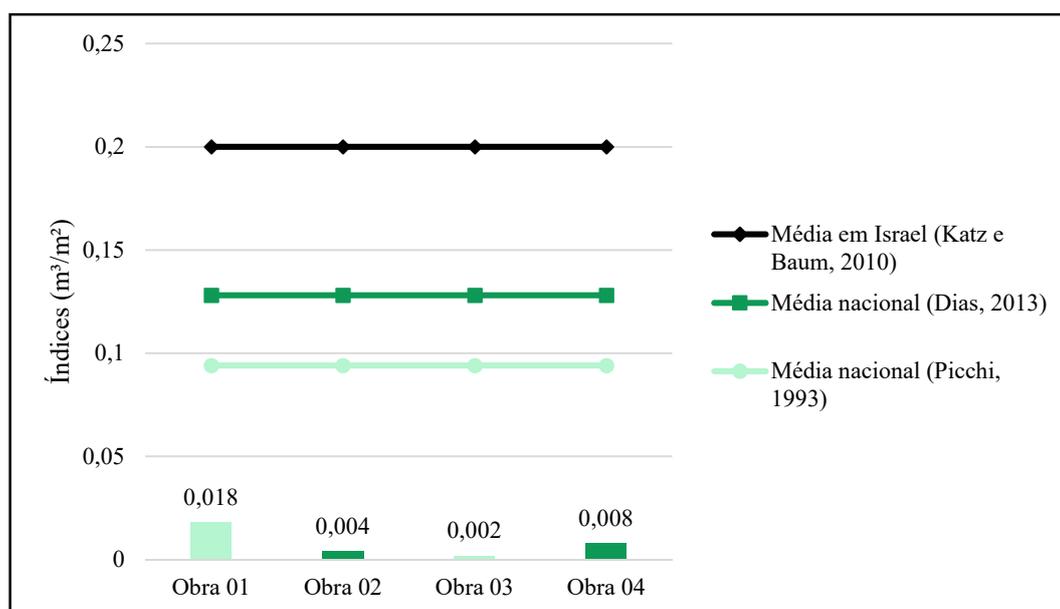


Figura 03: Índice de análise de resíduos (m³/m²). Fonte: elaborado pelos autores.

Os dados expostos na Figura 03 mostram, de forma comparatória, que os valores obtidos nas vistorias das obras de Belém do Pará são inferiores ao índice de Dias (2013) e inferiores, porém, mais próximos, ao índice de Picchi (1993). Revelando assim, que o gerenciamento de resíduos nas obras de Belém do Pará ainda não se solidificou e, além disso, a quantificação é bastante deficiente nas obras entrevistadas. Desse modo, comprova-se que o gerenciamento dos resíduos da construção civil não é realizado e se assemelha ao que era apresentado na literatura na década de 1990, onde a preocupação com resíduos da indústria da construção civil era quase nula.

4. Considerações Finais

Os índices obtidos através das respostas aos questionários apontaram resultados preocupantes sobre o gerenciamento dos resíduos nas construções em Belém do Pará. Observou-se que, os dados obtidos nas obras mostraram-se bem distantes do resultado médio nacional, estimado por Dias (2013) em $0,128 \text{ m}^3/\text{m}^2$, no entanto, mostraram-se mais aproximados do valor de $0,094 \text{ m}^3/\text{m}^2$ estimado por Picchi (1993). Desse modo, pode-se concluir que, mesmo com as legislações vigentes, as empresas de construção não evoluíram no interesse por iniciativas que aprimorem o desenvolvimento sustentável nos canteiros de obras, assemelhando-se assim, ao que estava sendo realizado no país na década de 1990.

Além disso, durante as vistorias técnicas, verificou-se a falta de conhecimento dos gestores, destas edificações, quanto à importância do gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos. Vale ainda salientar que as obras fiscalizadas apresentam falhas na aplicação das legislações vigentes, que exigem um trabalho diferenciado no tratamento dos seus resíduos. Além disso, salienta-se que, pouco sabia-se quantificar os volumes de resíduos gerados, assim como, quantificar por tipo e a reutilização destes resíduos. Desse modo, surge a urgente necessidade de uma fiscalização mais rigorosa e uma maior educação quanto a importância do gerenciamento dos resíduos junto as empresas do ramo construtivo.

Referências

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15114: Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação.** Rio de Janeiro, 2004.
- [2] BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n.º 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, e dá outras providências. **Diário Oficial União:** seção 1, p. 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010.
- [3] ANGULO, S. C.; TEIXEIRA, C. E.; CASTRO, A.L.; NOGUEIRA, T.P. Resíduos de construção e demolição: avaliação de métodos de quantificação. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 16, n. 3, p. 299–306, jul. 2011.
- [4] OLIVEIRA, Roberta Moura Martins. **Gestão e gerenciamento de resíduos sólidos urbanos: o programa de coleta seletiva da região metropolitana de Belém – PA.** 2012. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente Urbano) – Universidade da Amazônia, Belém, 2012.
- [5] PEREIRA, Paulo Miguel; VIEIRA, Castorina Silva. **Resíduos de construção e demolição. Um estado de arte visando a sua valorização em trabalhos geotécnicos.** Relatório (Projeto de Aplicação Sustentável de Resíduos de Construção e Demolição) – Universidade do Porto, Porto, 2013.
- [6] BELÉM (PA). Lei nº 8899, de 26 de dezembro de 2011. Institui o Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos do Município de Belém - PGRS e dá outras providências. **Diário Oficial do Município de Belém:** Belém, PA, 27 mar. 2012.
- [7] NASCIMENTO, Brisa do Mar Oliveira. **Identificação e análise de indicadores de resíduos de construção em obras verticais na região metropolitana de Belém – PA.** XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Porto Alegre, 2016.
- [8] PICCHI, Flávio Augusto. **Sistemas da qualidade: uso em empresas de construção de edifícios.** 1993. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- [9] CRUZ, Izadora Santana; CRUZ, Izaclaudia Santana. **Geração de Resíduos Sólidos da Construção Civil em Canteiros de Obras Convencional e Paineis: Estudo de caso de uma construtora em Aracaju/SE.** III Simpósio Iberoamericano de Engenharia de Resíduos, Aracajú, 2009.
- [10] DIAS, Michele Ferreira. **Modelo para Estimar a Geração de Resíduos na Produção de Obras Residenciais Verticais.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2013.
- [11] KATZ, A.; BAUM H. A novel methodology to estimate the evolution of construction waste in construction site. **Journal of Waste Management**, v. 31, n. 2, p. 353–358, 2010.

O Ciclo de Vida de Sofá Estofado: inventário de sofá retrátil

The Upholstered Sofa Life Cycle: Retractable Sofa Inventory

Áurea Luiza Quixabeira Rosa e Silva Rapôso, Dra, Instituto Federal de Alagoas.
aurea.raposo@ifal.edu.br

Resumo

O presente artigo apresenta estudo sobre o ciclo de vida de sofá estofado sob medida e relata sobre materiais, processos e perdas produtivas, associados à fabricação de sofá estofado retrátil, identificados durante Inventário do Ciclo de Vida (ICV). O ICV de sofá retrátil fez parte de pesquisa exploratória, de abordagem quantitativa-qualitativa; e, compôs a terceira fase da etapa de pesquisa de campo, a partir de estudo de caso em empresa de pequeno porte do setor de estofados sob medida. O estudo teve como objetivo avaliar o desempenho ambiental de unidade de sofá retrátil, com vistas à melhoria no produto e nos processos.

Palavras-chave: Design do Ciclo de Vida do Produto; Inventário; Desempenho ambiental

Abstract

This article presents a study on the life cycle of custom-made upholstered sofas and reports on materials, processes and production losses associated with the manufacture of retractable upholstered sofas, identified during the Life Cycle Inventory (ICV). The retractable sofa ICV was part of exploratory research, with a quantitative-qualitative approach; and, it comprised the third phase of the field research stage, based on a case study in a small company in the custom upholstery sector. The study aimed to evaluate the environmental performance of a retractable sofa unit, with a view to improving the product and processes.

Keywords: *Product Life Cycle Design; Inventory; Environmental performance*

1. Introdução

Todo produto provoca impactos, advindos dos principais estágios do seu ciclo de vida, relacionados à aquisição das matérias-primas; à produção do material; à fabricação do produto; ao uso e/ou à permanência do produto no mercado por dado período e ao seu descarte, como ilustra a Figura 1. Em qualquer um desses estágios do ciclo de vida do produto ou em todos eles, as partes interessadas revelam-se como co-responsáveis por esses impactos, destacando-se aqui os impactos ambientais. Os impactos ambientais podem ser positivos, quando provocam melhorias ou benefícios; e, podem ser negativos, quando provocam danos, visto que consistem em qualquer modificação do meio ambiente ocasionada por atividades, produtos, serviços e/ou processos (Platcheck, 2012, Pêgo, 2012, 2010; Almeida; Giannetti, 2006; Manzini; Vezzoli, 2005).

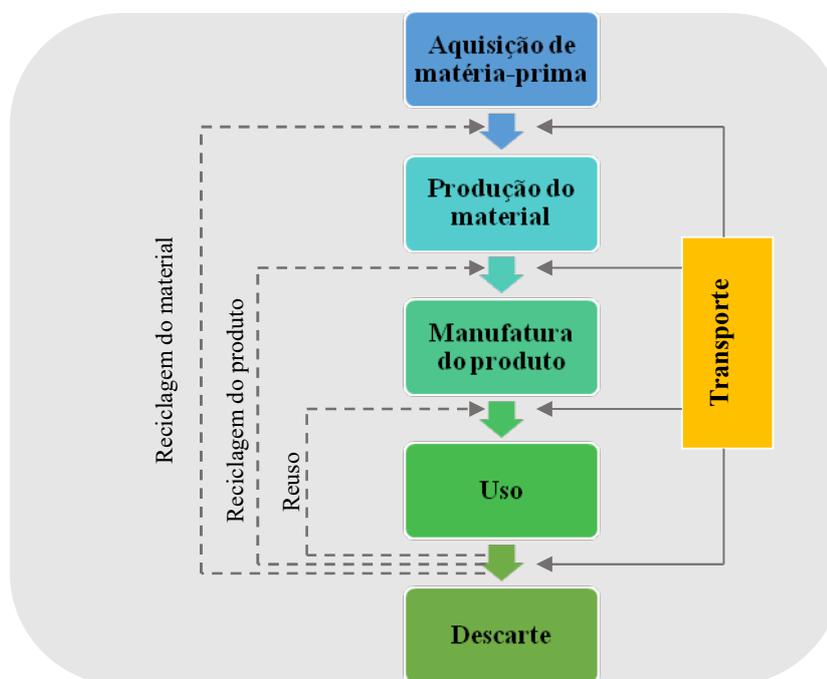


Figura 1: Principais estágios do ciclo de vida do produto. Fonte: elaborado pela autora, com base em Almeida e Giannetti (2006).

Como mostra a Figura 1, o primeiro estágio consiste na aquisição de matéria-prima. O segundo estágio envolve o processamento dessa matéria-prima para obtenção de materiais. No terceiro estágio, os materiais são manufaturados e transformados em produtos. O quarto estágio abrange o uso do produto; e, o quinto estágio compõe-se pelo descarte, pelo reuso ou pela reciclagem. A reciclagem pode ocorrer de duas formas: i. o produto é remanufaturado, constituindo-se material para a produção de outro produto; ii. o material é reciclado, sendo empregado como matéria-prima no processamento de outro produto (Almeida; Giannetti, 2006). De acordo com Almeida e Giannetti (2006), todos esses estágios, em conjunto com o transporte requerido para deslocar materiais e produtos, contribuem para o impacto causado.

A avaliação do ciclo de vida (ACV) do produto constitui-se no método empregado para avaliar os impactos ambientais de bens e serviços, analisando o produto e os processos quanto às matérias-primas, materiais e coprodutos, energia, resíduos (ou subprodutos, que estão vinculados à ineficiência da produção do material e/ou da manufatura do produto) e emissões associadas. O foco da ACV está no sistema de produto, estando dividida em três etapas:

planejamento, inventário e interpretação, conforme a ABNT NBR 14040 (2009) e a ABNT NBR 14044 (2009). O inventário do ciclo de vida (ICV) do produto consiste no balanço de massa e energia, em que todos os fluxos de entrada devem corresponder a um fluxo de saída, quantificado como produto, subproduto ou emissão. Este balanço de massa pode ser efetuado em qualquer parte do sistema de produto. O ICV permite identificar pontos críticos de desperdício de matéria-prima ou de geração de subprodutos, além de viabilizar o conhecimento detalhado do processo de produção (ABNT NBR 14040, 2009; ABNT NBR 14044, 2009).

O presente artigo apresenta estudo sobre o ciclo de vida de sofá estofado sob medida e relata sobre materiais, processos e perdas produtivas, associados à fabricação de sofá estofado retrátil, identificados durante ICV em empresa de pequeno porte (EPP) do setor de estofados sob medida da região do Agreste de Alagoas.

2. Procedimentos Metodológicos

O ICV de sofá retrátil fez parte de pesquisa exploratória, de abordagem quantitativa-qualitativa, desenvolvida por Rapôso (2014), no período de 2010-2013; e, compôs a terceira fase da etapa de pesquisa de campo, a partir de estudo de caso do tipo longitudinal em EPP do setor de estofados sob medida da cidade de Arapiraca-AL. A aplicação da ferramenta de ACV destinou-se ao desenvolvimento do ICV de unidade de sofá retrátil, visando à identificação dos aspectos e impactos ambientais do Ciclo de Vida do Sofá Estofado de acordo com as normas ABNT NBR 14040 (2009) e a ABNT NBR 14044 (2009).

O escopo do ICV foi avaliar o desempenho ambiental de unidade de sofá estofado retrátil – produto mais comercializado da indústria-caso – com vistas à indicação de ações de melhorias ambientais no produto e/ou nos processos. Entende-se por desempenho ambiental os resultados mensuráveis da gestão e produção de uma empresa sobre seus aspectos ambientais e que podem ser medidos com base na política ambiental, objetivos e metas ambientais de uma empresa e em outros requisitos de desempenho ambiental (ABNT NBR 14001, 2004). A Figura 2 sintetiza as fases da ACV aplicadas (área em destaque na cor azul) e os objetivos do ICV (área destacada em verde). A avaliação de melhorias foi subsequente à realização do ICV, voltada à proposição de design de Sistema de Produto+Serviço Sustentável (design de SPSS), e não foi realizada a avaliação do impacto, só a análise de inventário (Castillo, 2024; Rapôso, 2014; Giannetti *et al.*, 2008).

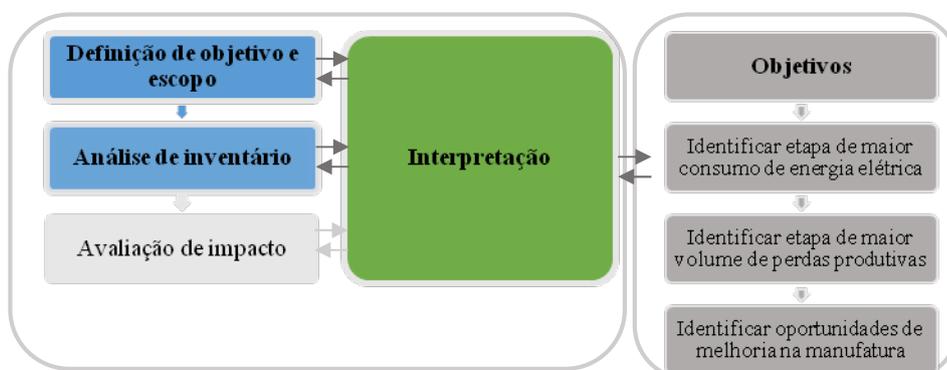


Figura 2: Fases da Avaliação do Ciclo de Vida e objetivos do estudo de ICV. Fonte: elaborado pela autora, com base na ABNT NBR 14040 (2009).

O modelo selecionado foi o sofá estofado com assento retrátil e encosto de almofadas soltas para uso residencial (sofá com assento prolongado móvel), com as dimensões de 2,30 m

de largura externa e 1 metro de profundidade externa; área de assento dividida em duas secções e largura útil de 1,80 metros. As dimensões atendem aos requisitos mínimos estabelecidos pela ABNT NBR 15164 (2004) na largura e profundidade de assento. Convém destacar que, face à infraestrutura tecnológica e produtiva de base semi-industrial, com forte presença de etapas manuais e a multiplicidade de matérias-primas e/ou materiais auxiliares de pouco volume e leves, a construção do estudo de ICV contribuiu, do ponto de vista acadêmico, para a organização da coleta, mensuração e tratamento dos dados primários diretos (obtidos no chão de fábrica durante o acompanhamento da produção do sofá selecionado) e semidiretos (dados tratados em laboratório, dados dos macroprocessos e dados secundários).

O sistema de produto analisado foi fabricação de sofá estofado. A função do sistema estabelecida foi fornecer assento, considerando as funções básica e secundárias do produto – função *sentar* e suas variações a partir de modelo de sofá estofado retrátil (sofá com prolongamento da área de assento). A unidade funcional estabelecida foi uma peça de sofá estofado com dois assentos prolongados para uso de dois usuários por 20440 horas na função do sistema, que correspondeu a fornecer 1 peça de sofá estofado com 2 assentos prolongados para uso de 2 usuários durante 4 horas por dia (total de 8 horas por dia, tempo máximo de uso/dia, quando o uso não ocorre de forma simultânea e compartilhada – uso individual – cenário limite) por um período de 7 anos (ou 2555 dias) (Rapôso, 2014).

O tempo de uso e permanência de 4 h/dia foi estimado como o tempo máximo ocupado pelo usuário na função do sistema (associada às funções de uso do produto), considerando uma rotina de 8 h/dia de jornada de trabalho, 6 h/dia de repouso, 2 h/dia de mobilidade (residência-trabalho-residência), 4 h/dia para atividades pessoais e domésticas. O fluxo de referência foi de 1 peça de sofá estofado retrátil. A fronteira do sistema foi definida pelos processos de produção, distribuição, uso e descarte. O detalhamento do estudo de ICV pode ser verificado na pesquisa base, elaborada por Rapôso (2014), sobretudo quanto às etapas de supervisão da qualidade, expedição e entrega (transporte e embalagem) e de uso, manutenção e descarte, além dos dados não computados e outras considerações.

A limitação da aplicação da ferramenta de ACV à fase de ICV teve por finalidade que o estudo de ICV se constituísse no primeiro balanço ambiental e energético da indústria-caso e em referência para a continuidade de aplicação da ferramenta de ACV, a exemplo do estudo de Lins *et al.* (2015), analisou a eficiência produtiva do corte da madeira para a fabricação de grade de sofá com assento retrátil por meio do balanço de massa.

O estudo de ICV mostrou-se relevante como instrumento de disseminação e incentivo à aplicação da ferramenta de ACV em EPP, visto que a ferramenta de ACV no Brasil tem sido mais aplicada em sistemas industriais de grande porte e que a indústria-caso de Arapiraca-AL não se encontrava familiarizada com os conceitos de ciclo de vida do produto e de ferramenta de ACV, bem como com as possíveis melhorias no desempenho ambiental e produtivo que estes conceitos poderiam proporcionar no âmbito do desenvolvimento dos produtos-serviços e dos processos de produção (Rapôso, 2014).

3. Resultados

3.1. O ciclo de vida do sofá estofado

O ciclo de vida do sofá estofado envolve no mínimo três cadeias produtivas – Madeira e Móveis, Petroquímico-têxtil e Química – e três materiais predominantes – madeira, espuma e tecido. O ciclo de vida genérico do sofá estofado encontra-se representado na Figura 2 a seguir. Trata-se de representação esquemática do ciclo de vida genérico de um sofá estofado,

em que as linhas sólidas indicam os fluxos de matérias-primas, combustível e energia do (1) ao (10). Observa-se que esse ciclo de vida não favorece a otimização da vida útil do produto e/ou a extensão da vida dos materiais, sobretudo na fase de descarte (10), exceto em caso de doação a terceiros (11 e 12) e coleta por catadores e/ou cooperativas de reciclagem em que se inicia uma nova fase de uso e, posterior, descarte (13 e 14). Contudo, é sempre incerta a destinação final do estofado usado quando é depositado no lixão ou logradouro público, sobretudo quando estas alternativas e/ou microciclos se esgotam (Rapôso, 2014).

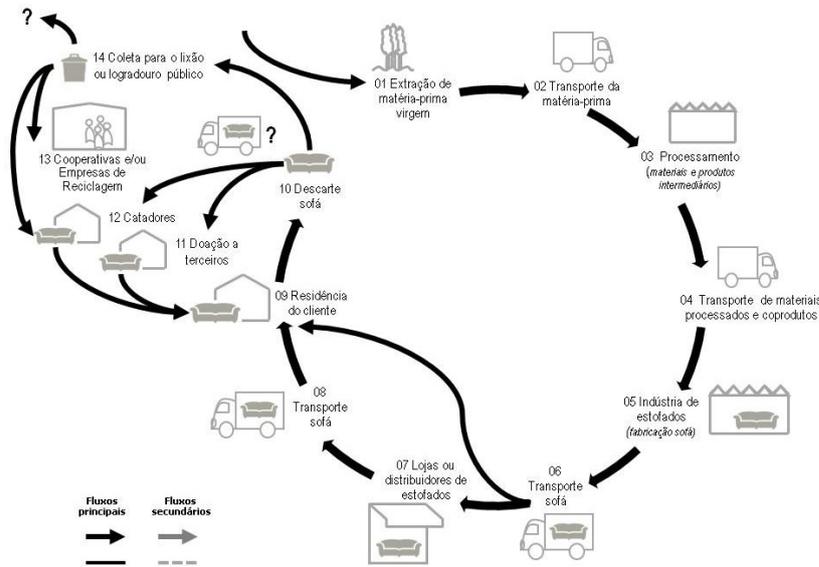


Figura 2: Ciclo de vida genérico do sofá estofado. Fonte: elaborado pela autora, com base em Rapôso (2014).

A Figura 3 ilustra o ciclo de vida do sofá estofado da indústria-caso. Os aspectos, que motivaram este estudo ser aplicado ao setor de estofados sob medida e em pequena escala, foram baseados na investigação do que caracterizava e movimentava o ciclo de vida do sofá estofado da indústria-caso: oferta integrada de produto-serviço, com fabricação de estofado novo e reuso de usado (reforma); garantia de 7 anos na estrutura de madeira e de 2 anos no estofamento (espuma), além da personalização como diferencial do modelo de negócio, agregando valor de uso e vínculo pessoal (Rapôso, 2014).

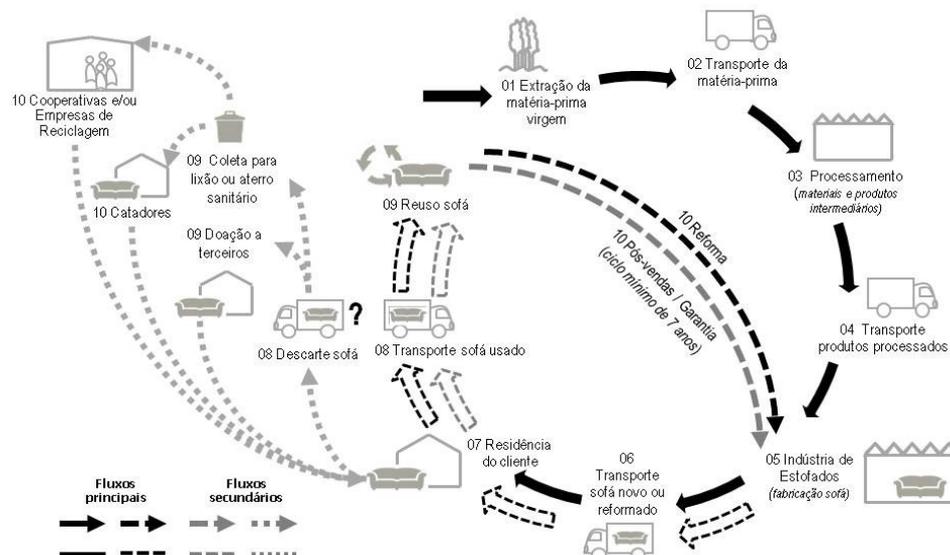


Figura 3: Ciclo de vida do sofá estofado da indústria-caso. Fonte: elaborado pela autora, com base em Rapôso (2014).

Observa-se na Figura 3 que a oferta do serviço de reforma viabiliza alternativas de reuso do sofá ao usuário-consumidor (9 e 10), que favorecem o adiamento do fim de vida ou descarte do sofá usado, bem como reduz a demanda de recursos para produção de estofado novo durante o tempo de vida útil mínimo que corresponde ao tempo de garantia do produto (Rapôso, 2014).

3.2. A produção do sofá estofado retrátil

A fabricação do sofá estofado retrátil selecionado seguiu a linha de produção da indústria-caso, composta por três etapas: estrutura e percinta (1), estofamento (2) e revestimento e montagem (3), como mostra a Figura 4 (cf. linha tracejada). Trata-se de produção semi-industrial, com predominância de processos manuais que dependem diretamente da habilidade e perícia da equipe de produção, composta por marceneiro, estofador e montador.

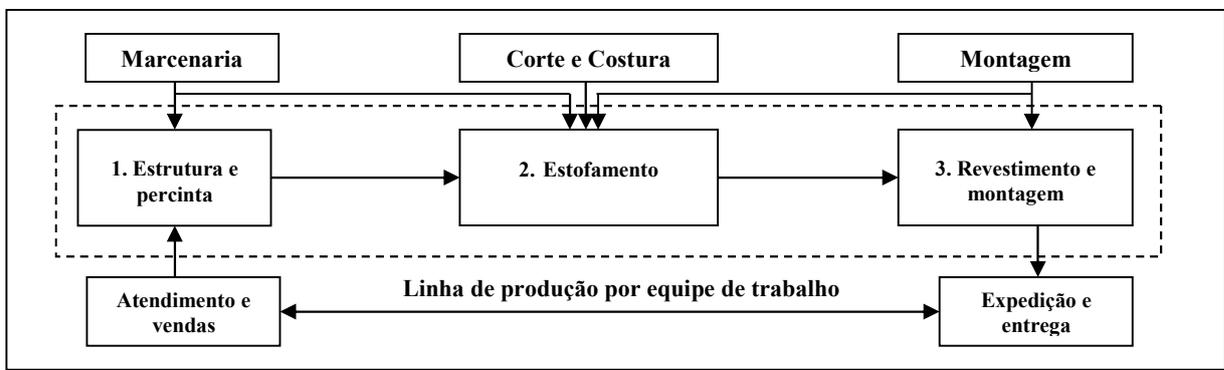


Figura 4: Fluxograma simplificado dos processos de produção de estofados sob medida da indústria-caso. Fonte: elaborado pela autora, com base em Rapôso (2014).

Já a Figura 5 sintetiza o fluxograma do ICV para sofá estofado retrátil, representando os macroprocessos e as unidades de processos elementares, fluxos de entrada, fluxos intermediários e fluxos de saída, levantados intrafábrica. A estrutura de um sofá estofado consiste na armação básica para sustentação das demais partes que o compõem e suporta o sistema de suspensão, estofamento e revestimento, e o usuário (ABNT NBR 15164, 2004). A estrutura do modelo de sofá selecionado compunha-se por 5 módulos: 1 módulo de base de assento integrada ao encosto (módulo A), 2 módulos de apóia-braços (módulos B e C) e 2 módulos de assentos com prolongadores (módulos D e E). Conforme mostra a Figura 5, a etapa de Estrutura e Percinta envolveu 4 processos elementares: corte da madeira, montagem da grade de madeira, aplicação de percinta elástica (sistema de suspensão), aplicação de tecido de ráfia e papelão (planos de suporte) (Rapôso, 2014).

O estofamento compõe-se por todos os materiais que estiverem entre a estrutura e o revestimento, como espumas, manta acrílica (ou acrílon), fibra sintética e flocos de espuma (ABNT NBR 15164, 2004). O macroprocesso de Estofamento (cf. Figura 5) abrangeu 5 processos elementares: corte da espuma, colagem da espuma, corte do tecido de revestimento, costura das peças de tecido de revestimento, corte e costura do TNT (capas das almofadas) (Rapôso, 2014).

O revestimento engloba o processo de recobrimento da estrutura e do estofamento, sendo responsável pela aparência e acabamento do mobiliário, enquanto que a montagem consiste na “ação de conjugar todas as partes de um móvel” (ABNT NBR 12666, 1992, p. 6; ABNT NBR 15164, 2004). A etapa de Revestimento e Montagem compôs-se por 2 processos elementares: revestimento dos módulos (e pré-montagem) e acabamento e montagem (Rapôso, 2014).

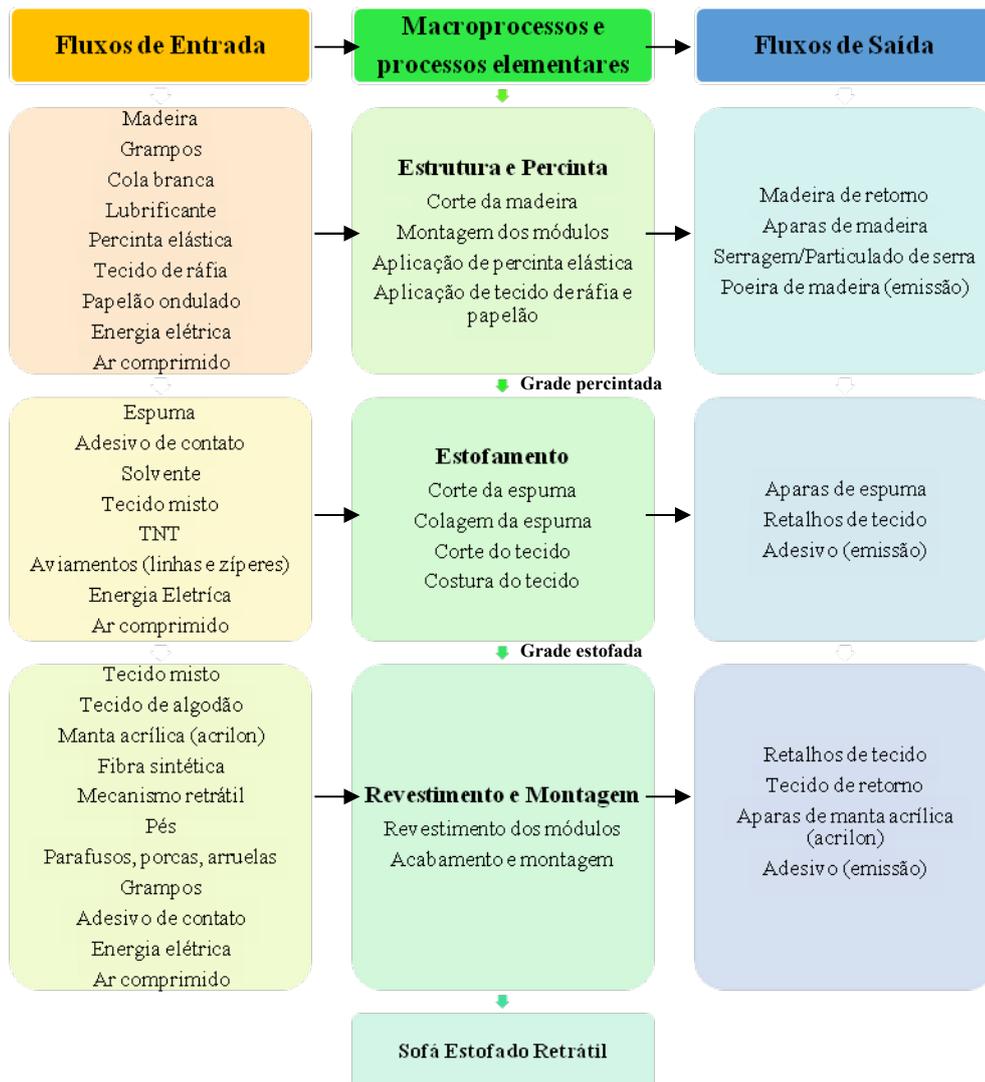


Figura 5: Fluxograma dos macroprocessos da fabricação de sofá retrátil. Fonte: elaborado pela autora, com base em Rapôso (2014).

Além dos macroprocessos de fabricação do sofá indicados na Figura 5, o estudo de ICV analisou os processos de supervisão da qualidade e embalagem do produto; armazenamento, expedição e entrega; e, transporte; assim como 2 cenários de uso do produto, cuja principal função de uso, indicada pelos usuários-consumidores, foi *assistir televisão*, considerando ambiente residencial e contexto de uso para o qual foi adquirido: sala de estar e *home-theater* (Rapôso, 2014).

4. Análises dos Resultados do ICV do sofá retrátil

O inventário constitui-se nos dados de entrada e saída do *sistema de produto* em tela, reunindo todos os valores por peça referente às matérias-primas, produtos intermediários, energia e subprodutos, que entram e saem nos limites do sistema (ABNT NBR 14040, 2009; ABNT NBR 14044, 2009). O resultado do ICV consiste no balanço dos fluxos de material e energia relacionados às etapas do ciclo de vida de um produto – da obtenção da matéria-prima a disposição final, através da listagem de materiais, produtos, coprodutos e perdas em kg/peça e de energia requerida em kWh/peça (Giannetti *et al.*, 2008). Como resultado do ICV do sofá retrátil, obteve-se que para 1 peça de sofá com 2 assentos prolongados para uso de 2 usuários

foram utilizados 70,91 kg de materiais, conforme ilustra a Tabela 1, que sintetiza todas as entradas da fabricação para 1 unidade de sofá estofado (Rapôso, 2014).

Tabela 1: Entradas da fabricação de 1 peça de sofá estofado retrátil.

Macroprocessos	Entradas	Valor	Unidade
Estrutura e Percinta	Peças de madeira	41,28	kg/peça
	Grampos barra 50	0,564	kg/peça
	Cola branca	0,1	kg/peça
	Percinta elástica	0,946	kg/peça
	Papelão ondulado	0,2804	kg/peça
	Papelão ondulado	0,2145	kg/peça
	Grampos barra 16	0,084	kg/peça
Estofamento	Peças de espuma D33 e D23	8,9799*	kg/peça
	Adesivo de contato	2,272	kg/peça
	Grampos barra 8	0,308**	kg/peça
	Peças de tecido misto	4,4698	kg/peça
	Capas internas de TNT (almofadas)	0,1508	kg/peça
Revestimento e Montagem	Manta acrílica (acrilon)	0,065	kg/peça
	Tecido de algodão cru	0,751	kg/peça
	Parafusos de montagem	0,16298	kg/peça
	Mecanismos retráteis	4,11	kg/peça
	Parafuso para dispositivo deslizador	0,049320	kg/peça
	Pés	1,1	kg/peça
	Parafusos para componente (pés)	0,0404	kg/peça
	Fibra sintética	4,99	kg/peça
Total		70,91	kg/peça

Notas: (*) Total de espuma aplicada a peça; (**) Total de grampos barra 8 aplicados a peça. Fonte: Autora, com base em Rapôso (2014).

Foram gerados 15,57 kg/peça de subprodutos e/ou perdas produtivas. A Tabela 2 demonstra que foram destinados ao reuso interno: 11,16 kg/peça de madeira de retorno, 0,81 kg/peça de aparas de espuma, 0,025 kg/peça de acrílon e 0,075 kg/peça de tecido de retorno em fibras de algodão. E, ao reuso externo: 1,61 kg/peça de madeira de descarte para padaria local e 1,67 kg/peça de serragem para produção avícola. Foram descartados 0,200 kg/peça de aparas de tecido misto (Rapôso, 2014).

Tabela 2: Saídas da fabricação de 1 peça de sofá estofado retrátil.

Macroprocessos	Saídas	Valor	Unidade	Destino
Estrutura e Percinta	Madeiras de retorno	11,16	kg/peça	Volta ao sistema para reuso em outras peças
	Madeiras de descarte	1,61	kg/peça	Queima em forno de padaria local
	Serragem	1,67	kg/peça	Produção avícola local
Estofamento	Aparas de espuma	0,81	kg/peça	Volta ao sistema na forma de flocos
Revestimento e Montagem	Aparas de tecido misto	0,20	kg/peça	Descarte
	Aparas de acrílon	0,025	kg/peça	Volta ao sistema para reuso em outras peças
	Tecido de retorno em fibras de algodão	0,075	kg/peça	Volta ao sistema para reuso em outras peças
Total		15,57	Kg/peça	

Fonte: Autora, com base em Rapôso (2014).

A etapa de maior geração de subprodutos foi o macroprocesso da Estrutura e Percinta, com a geração de 14,44 kg/peça que correspondem a 98% de subprodutos de madeira, seguido do macroprocesso de Estofamento, com 5% de subprodutos de espuma e do macroprocesso Revestimento e Montagem, com 1,8% de subprodutos de tecido e 0,2% de subprodutos de acrílon (Rapôso, 2014).

Considerando a produção média de 15 sofás estofados retráteis por mês pela indústria-caso, similares ao sofá estofado retrátil analisado, e a quantidade de madeira de retorno e de descarte gerada (12,77 kg/peça), a quantidade total de subprodutos de madeira perdida por mês, corresponde a 191,55 kg. Essa quantidade de madeira equivaleria à produção de pelo menos 4 novas estruturas de madeira (ou grade) para o modelo de sofá estofado retrátil, cujas peças correspondem a 41,28 kg/peça (cf. Tabela 1) (Rapôso, 2014).

Conforme Tabela 3, a etapa de maior consumo de energia elétrica foi a de uso do produto, tanto em cenário limite quanto em cenário ideal, em razão de equipamentos eletrônicos domésticos pelos usuários (e.g. TV e *home-theater*), associados às principais funções de uso (*sentar-relaxar*, *assistir TV* e *ouvir música*) e à manutenção (e.g. aspirador de pó). O consumo de energia elétrica referente à iluminação artificial também é maior nesta etapa. Para a manutenção do sofá estofado em tecido, a indústria-caso indicou a aspiração leve e periódica. Logo, durante a manutenção, foi considerado que o sofá estofado retrátil geraria consumo de energia elétrica referente ao aspirador de pó de uso doméstico. O consumo médio mensal do aspirador de pó doméstico é de 7,17 kWh/mês para uma média de utilização de 20 min/dia. O consumo anual de energia elétrica referente ao uso do aspirador de pó será de 86,04 kWh. Considerando tempo de vida útil de 7 anos para o sofá (84 meses), o consumo total de energia elétrica na fase de uso referente à manutenção será de 602,28 kWh (Rapôso, 2014).

Foi constatado que o consumo total de energia elétrica será 3200,32 kWh/peça, quando o uso for compartilhado por 2 usuários (cenário ideal, definido por 10220 horas de uso) e 5590,20 kWh/peça, quando o uso não ocorrer de forma compartilhada (cenário limite, definido por 20440 de uso) (Rapôso, 2014).

Tabela 3: Consumo total de energia elétrica no ciclo de vida do sofá retrátil.

Item	Tipo de consumo	kWh/peça	kWh/peça
		Uso compartilhado	Uso não compartilhado
1	Consumo direto de máquinas e equipamentos da etapa de produção	38,10	38,10
2	Consumo direto de iluminação artificial da etapa de produção	6,27645	6,27645
3	Consumo indireto de máquinas e equipamentos da etapa de produção (<i>sistema pneumático</i>)	156,50	156,50
4	Consumo indireto da iluminação artificial da etapa de produção	18,40	18,40
5	Consumo direto de equipamentos da etapa de uso	2566,96	4553,64
6	Consumo direto da iluminação artificial da etapa de uso	414,08	817,28
Total		3200,32	5590,20

Fonte: Autora, com base em Rapôso (2014).

As Tabelas 1, 2 e 3 sintetizaram os principais resultados da análise quantitativa do ICV.

O Quadro 1 resume a análise qualitativa do ICV quanto aos aspectos e impactos ambientais por macroprocesso de fabricação do sofá estofado retrátil e apresenta os requisitos ambientais prioritários identificados para geração de soluções ecoeficientes específicas ao sistema de produto estudado (Vezzoli, 2010; Almeida; Giannetti, 2006; Manzini; Vezzoli, 2005).

Quadro 1: Síntese dos aspectos e impactos ambientais do ciclo de vida de sofá estofado retrátil.

Macroprocesso (e/ou Etapa do ciclo)	Aspecto ambiental	Impacto ambiental (+ e/ou -)	Requisitos ambientais
Estrutura e percinta	Madeiras de retorno	Pressão sobre os recursos naturais	Minimização de recursos
	Madeiras de descarte	Reuso interno e/ou reuso externo	Minimização e valorização

	Serragem	(queima)	de resíduos
		Pressão sobre os recursos naturais	Minimização de recursos
	Emissão de pó de serra	Reuso interno e/ou reuso externo (produção avícola local)	Minimização e valorização de resíduos
		Alteração da qualidade do ar no ambiente de trabalho (marcenaria)	Minimização de toxicidade
Papelo ondulado reconduzido de embalagens descartadas pós-uso	Doenças respiratórias em funcionários	Reuso interno	Minimização de toxicidade
Estofamento	Espuma de retorno Aparas de espuma Flocos de espuma	Pressão sobre os recursos naturais	Minimização de recursos
	Emissão cola de contato à base de solvente	Alteração da qualidade do ar local	Minimização de toxicidade
	Retalhos de tecidos	Reuso interno	Minimização e valorização de resíduos
	Recipiente pós-uso do adesivo de contato	Periculosidade (toxicidade)	Minimização de recursos
Revestimento e montagem	Aparas de acrílon	Pressão sobre os recursos naturais	Minimização de recursos Minimização e valorização de resíduos
	Tecido de retorno em fibras de algodão	Pressão sobre os recursos naturais	Minimização de recursos Minimização e valorização de resíduos
Distribuição e Transporte	Emissões de diesel	Alteração da qualidade do ar local	Minimização de toxicidade
		Periculosidade (toxicidade)	Minimização de toxicidade
Uso e manutenção	Desgaste material do tecido	Pressão sobre os recursos naturais	Otimização da vida do sistema Minimização e valorização de resíduos
Descarte	Disposição em aterro	Pressão sobre os recursos naturais Alteração da qualidade do solo local	Otimização da vida do sistema Minimização e valorização de resíduos Minimização de toxicidade

Fonte: Autora, com base em Rapôso (2014).

Com base nas análises quantitativa (Tabelas 1, 2 e 3) e qualitativa (Quadro 1), foram geradas recomendações enquanto oportunidades iniciais de melhoria na manufatura, das quais se destacam:

- No processo de Estrutura e Percinta, quanto à reutilização interna parcial do volume de madeiras de retorno e madeiras de descarte, o uso de tonel para o armazenamento inviabiliza o acesso e a visualização das madeiras disponíveis ao reuso, além de gerar contaminação do material, visto que o reuso do tonel do adesivo não é recomendado para saúde e segurança dos funcionários, devido à periculosidade e toxicidade de substâncias químicas residuais sedimentadas nas paredes internas, sendo considerado resíduo perigoso (Classe I) de acordo com ABNT NBR 10004 (2004);
 - Recomendação 1: a organização dessas perdas em caixas de madeira catalogadas por subprodutos e direcionadas a reusos específicos permitiria que os marceneiros identificassem mais facilmente madeiras de retorno estocadas e reduziria o corte desnecessário de novas tábuas;
 - Recomendação 2: a instalação de sistema coletor de pó nas máquinas e equipamentos contribuiria para melhoria da qualidade do ambiente de produção, sobretudo na área da marcenaria, quanto à emissão da poeira de madeira, além de favorecer a coleta eficiente do material particulado e da serragem produzidos, reduzindo os riscos de doenças respiratórias dos funcionários.

- No processo de Estofamento, quanto ao corte das espumas, observaram-se alguns fatores que contribuem para acúmulo e desperdício: a) a inexistência de plano de corte, em função de produção sob medida; b) a não setorização das espumas de retorno contribui para que parte delas não seja reutilizada e perca algumas de suas propriedades pela ação de intempéries;
 - Recomendação 3: a organização das perdas de espumas em estantes, catalogadas por densidade e espessura, permitiria que estofadores e/ou montadores identificassem mais facilmente as espumas de retorno estocadas e reduziria o corte desnecessário de placas novas, visto que o descarte inapropriado ou a queima das espumas pode liberar toxinas para o ar, causando danos ao meio ambiente e à saúde pública;
 - Recomendação 4: o reuso interno das aparas de espumas para produção de flocos reduz a pressão sobre recursos não renováveis e aplica a reciclagem em cascata no âmbito da circulação interna dos materiais, mas deve estar adequado à demanda de produção dos estofados e/ou acessórios para não gerar excedentes.
 - Recomendação 5: com relação às perdas dos tecidos, constatou-se a falta de planejamento da produção e controle do estoque para que as peças em uso sejam utilizadas de forma maximizada. A organização das peças de tecidos em uso em estantes setorizadas por faixas de 5, 10, 20 e 30 metros facilitaria a identificação do rolo que melhor se adequa à peça a ser produzida a fim de evitar ou minimizar a geração de perdas.
- Quanto ao design do produto e/ou dos processos, verificou-se a inexistência de documentação técnica detalhada dos modelos e/ou moldes de corte completos para os produtos, solicitando contínuas adaptações dos projetos existentes por parte das equipes de produção, que comprometem a eficiência produtiva quanto à minimização de recursos e à minimização e valorização de subprodutos.
 - Recomendação 6: a criação de setor de Design na indústria-caso poderia favorecer melhorias dos processos e soluções ecoeficientes para o desenvolvimento dos produtos-serviços visando à otimização da vida do sistema, como por exemplo, a simplificação do processo de montagem/desmontagem a fim de facilitar a manutenção futura nos produtos pelos serviços de reforma.

Por fim, a análise do ICV do sofá estofado retrátil foi conectada a prioridades de design na dimensão ambiental da sustentabilidade para o sistema de oferta de estofados personalizados da indústria-caso, a partir dos requisitos ambientais elencados no Quadro 1, com vistas ao design de Sistema de Produto+Serviço Sustentável (SPSS) para estofado personalizado, destinado a micro e pequenos negócios da região do agreste do estado de Alagoas, resultado final da pesquisa de Rapôso (2014).

5. Considerações Finais

O ICV do sofá estofado retrátil contribuiu para identificação tanto dos aspectos ambientais inseridos no produto e no processo de fabricação quanto dos potenciais impactos ambientais que precisavam ser solucionados para melhoria do desempenho ambiental. Apresentou como resultados, contextualizados ao cenário produtivo da indústria-caso, que: i. para 1 peça de sofá estofado com 2 assentos prolongados para uso de 2 usuários são utilizados 70,01 kg/peça de materiais e gerados 15,57 kg/peça de subprodutos; ii. a etapa de maior volume de subprodutos no Ciclo de Vida do Sofá Estofado Retrátil foi o macroprocesso Estrutura e Percinta da

produção, com volume correspondente a 98% dos subprodutos de madeira gerados; e, iii. a etapa de maior consumo energético constituir-se-á a etapa de uso do sofá, com o consumo de 3200,32 kWh/peça, quando o uso for compartilhado e de 5590,20 kWh/peça, quando o uso não ocorrer de forma compartilhada.

Este ICV permitiu não só analisar os macroprocessos de fabricação do modelo de sofá estofado retrátil selecionado, mas indicar os potenciais aspectos e impactos ambientais nas etapas de produção, uso, distribuição e descarte do seu ciclo de vida, correlacionando-os aos requisitos ambientais prioritários para geração de soluções específicas ao sistema de produto estudado, visando design de SPSS; e, viabilizou a formação de primeira base de dados sobre o Ciclo de Vida do Sofá Estofado Retrátil para a indústria-caso e comunidade acadêmica, constituindo-se em referência para estudos futuros evolutivos e comparativos, reaplicados a esta peça e/ou outras peças estofadas, com vistas à melhoria da produtividade e eficiência e ao menor impacto ambiental.

Referências

- [1] PLATCHECK, E. R. **Design Industrial: metodologia de Ecodesign para o desenvolvimento de produtos sustentáveis**. São Paulo: Atlas, 2012.
- [2] PÊGO, K. A. C.; PEREIRA, A. F.; CARRASCO, E. V. M. Inserção de Parâmetros Ambientais no Desenvolvimento de Produtos: Caso Categoria Móveis de Madeira. **Revista Estudos em Design**, v. 20 (n. 1), 2012, p. 1-24.
- [3] PÊGO, K. A. C. **Guia para inserção de parâmetros ambientais no design de móveis de madeira**. Barbacena, MG: EdUEMG, 2010.
- [4] ALMEIDA, C. M. V. B. de; GIANNETTI, B. F. **Ecologia Industrial: conceitos, ferramentas e aplicações**. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.
- [5] MANZINI, E.; VEZZOLI, C. **O desenvolvimento de produtos sustentáveis: os requisitos ambientais dos produtos industriais**. 1. ed. 1. reimpr. São Paulo: EDUSP, 2005.
- [6] ABNT NBR 14040. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 14040: Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- [7] ABNT NBR 14044. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 14044: Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
- [8] RAPÔSO, Á. L. Q. R. e S. **Modelo de Sistema de Produto-Serviço para Estofado Personalizado: sustentabilidade ambiental e inovação em modelo de negócio para estofadora do APL de Móveis do Agreste (Alagoas, Brasil)**. 430 f. il. 2014. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da UFBA, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014. Disponível em: <http://www.pei.ufba.br/sites/pei.ufba.br/files/cd_tese_aurea_luiza_raposo_vsf_07-07-2014.pdf>. Acesso em abril de 2024.
- [9] ABNT NBR 14001. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 14001: Sistema da gestão ambiental – Requisitos com orientações para uso**. Rio de Janeiro: ABNT, dez. 2004.

- [10] CASTILLO, L. Introdução. In: SANTOS, A.; BRAGA JUNIOR, A. E.; BARAUNA, D.; CASTILLO, L.; DIEHL, M. R.; LEPRE, P. R. **Design para a Sustentabilidade: Ferramentas**. Curitiba: LeNS Brazil; Editora Insight, 2024.
- [11] GIANNETTI, B. F.; ALMEIDA, C. M. V. B. de; BONILLA, S. H.; RIBEIRO, C. M. Inventário de ciclo de vida da manufatura de seringas odontológicas. **Produção**, v. 18, n. 1, 2008, p. 155–169.
- [12] ABNT NBR 15164. Associação Brasileira das Normas Técnicas. **ABNT NBR 15164: Móveis estofados – Sofás**. Rio de Janeiro: ABNT, abr. 2004.
- [13] LINS, P. S. ; SILVA, C.; SOUZA, S.; RAPÔSO, Á. L. Q. R. e S. Balanço de Massa do Corte da Madeira para Fabricação de Grade de Sofá com Assento Retrátil. In: **Anais do 5th International Workshop Advances in Cleaner Production**, São Paulo, UNIP, 2015.
Disponível em:
<https://www.advancesincleanerproduction.net/fifth/files/sessoes/6B/1/lins_ps_et_al_academica.pdf>. Acesso em maio de 2024.
- [14] ABNT NBR 12666. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 12666: Móveis – Terminologia**. Rio de Janeiro: ABNT, ago. 1992.
- [15] VEZZOLI, C. **Design de sistemas para a sustentabilidade: teoria, métodos e ferramentas para o design sustentável de “sistemas de satisfação”**. Salvador: EDUFBA, 2010.

A RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL *RECYCLING SOLID WASTE IN CIVIL CONSTRUCTION*

Ana Beatriz Mascarenhas Pereira, Doutora em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável, Universidade Federal de Minas Gerais.

tizamascarenhas@arq.ufmg.br

Gisele Vidal Vimeiro, Doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais

giselevv@cefetmg.br

Samuel Rodrigues Castro, Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais

samuel.castro@ufjf.br

Bruno Henrique Lourenço Camargos, Mestre em Engenharia Civil, Universidade do Estado de Minas Gerais.

bruno.camargos@uemg.br

Roberto Galéry, Doutor em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais

rgalery@demin.ufmg.br

Resumo

Os eventos climáticos extremos observados sobretudo no século XXI evidenciam a necessidade urgente de mudança de hábitos. Na construção civil, a reciclagem de resíduos sólidos, por meio da logística reversa e responsabilidade compartilhada, é essencial. Esta prática reduz a pegada de carbono, promove a economia circular e melhora a sustentabilidade, combatendo a poluição e o esgotamento de recursos naturais. Este trabalho revisa experiências de reaproveitamento de vidro moído e tipos de plástico, especialmente os contaminados e não recicláveis, para criar um composto utilizado na construção civil. Essa abordagem transforma resíduos em materiais úteis, contribuindo significativamente para a sustentabilidade ambiental.

Palavras-chave: Vidro; plástico; tecnologias; coprodutos; sustentabilidade.

Abstract

The extreme weather events observed especially in the 21st century highlight the urgent need to change habits. In civil construction, the recycling of solid waste, through reverse logistics and shared responsibility, is essential. This practice reduces the carbon footprint, promotes the circular economy and improves sustainability, combating pollution and the depletion of natural resources. This work reviews experiences of reusing ground glass and types of plastic, especially contaminated and non-recyclable ones, to create a composite used in construction. This approach transforms waste into useful materials, contributing significantly to environmental sustainability.

Keywords: Glass; plastic; technologies; co-products; sustainability.

1. Introdução

Publicado em março de 2023, o Sexto Relatório de Avaliação (AR 6) do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), indicou que o aumento e a intensidade de eventos climáticos extremos estão diretamente relacionados com as atividades humanas. O documento também ressalta que, a despeito da existência de uma pequena janela de oportunidade para mitigar esses efeitos, as chances de garantir um futuro habitável tornam-se cada vez mais escassas. A logística reversa, considerando a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos materiais e a promoção de novos hábitos de lidar com os resíduos, contribui para melhorar a pegada de carbono, refletindo diretamente nos indicadores de sustentabilidade.

Em 2015, a Organização das Nações Unidas (ONU) lançou os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) cujas 169 metas estão relacionadas com questões ambientais, sociais e econômicas a serem implementadas até 2030. Neste sentido, a logística reversa, considerando a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos materiais e a promoção de novos hábitos de lidar com os resíduos, contribui para melhorar a pegada de carbono, refletindo diretamente nos indicadores de sustentabilidade, pois os resíduos sólidos urbanos também são responsáveis pelo lançamento de CO₂ na atmosfera.

Estima-se que em 2016 foram geradas 2,01 bilhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, e espera-se que este número atinja 3,4 bilhões de toneladas até 2050. Globalmente, cerca de 37% dos resíduos são descartados em algum tipo de aterro, 33% são despejados no meio ambiente, 19% são destinados e recuperados por meio de reciclagem e compostagem e 11% são incinerados [1].

Tendo em vista este fato e considerando que os recursos naturais estão cada vez mais limitados, a reciclagem e reaproveitamento de resíduos é cada vez mais urgente. A reutilização de resíduos sólidos urbanos, ou seja, o processo de transformação de materiais descartáveis em novos insumos e produtos vem ao encontro de práticas sustentáveis, diminuindo os danos ao meio ambiente e promovendo o desenvolvimento econômico.

O plástico, um material onipresente na vida cotidiana, apesar de sua versatilidade e baixo custo, é extremamente danoso ao meio ambiente. Aproximadamente dez mil produtos químicos estão relacionados aos plásticos, e pelo menos 2.400 são prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana. Desde a década de 1950, foram produzidas 8,3 bilhões de toneladas de plástico no mundo, das quais cerca de 79% acabaram em aterros ou foram descartadas no meio ambiente. Atualmente, segundo a *World Wide Fund for Nature*, a cada minuto um caminhão cheio de embalagens plásticas é despejado nos oceanos [2].

Além do plástico, o vidro também é um material reciclável e pode ser totalmente reciclado sem perder qualidade. A produção anual de vidro no mundo é de aproximadamente 130 milhões de toneladas. No entanto, estima-se que apenas 27 milhões de toneladas sejam recicladas, representando cerca de 21% da produção total de vidro [8].

Além do plástico, o vidro é também um material reciclável; na verdade, pode ser totalmente reciclado sem perder qualquer traço de sua qualidade original. Em todo o mundo, a produção anual de vidro é de aproximadamente 130 milhões de toneladas. No entanto, segundo a *Global*

Glass Recycling Alliance [9], estima-se que apenas 27 milhões de toneladas são recicladas, representando cerca de 21% da quantidade de vidro produzido.

O relatório da Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA, 2023) aponta que cada brasileiro gerou, em média, 1,04 kg de resíduos sólidos urbanos¹ por dia, totalizando mais de 77 milhões de toneladas no ano de 2022 [10].

O presente trabalho procura, dessa maneira, apresentar uma revisão bibliográfica de algumas tecnologias desenvolvidas para utilização de plástico e vidro na fabricação de elementos da construção civil.

2. Procedimentos Metodológicos

Neste trabalho, conduziu-se uma revisão sistemática da literatura (RSL) por meio do método SREE (*Systematic Review for Engineering and Experiments*). Conforme observado por Galvão e Ricarte [11], esse método demonstra eficácia quando conduzido de acordo com protocolos específicos, visando compreender e organizar um amplo conjunto de documentos, com destaque especial quando se evidencia eficácia ou não em um contexto específico. De acordo com Azevedo *et al.* [12], para o método proposto (SREE), sugere-se a adequação da estruturação da RSL por meio da inclusão das etapas (1-3), a saber: 1. Planejamento da pesquisa; 2. Elaboração da pergunta de pesquisa; 3. Busca na literatura; 4. Seleção dos artigos; 5. Extração dos dados (artigos); 6. Avaliação da qualidade metodológica; 7. Síntese dos dados (metanálise); 8. Redação e publicação dos resultados.

Para a seleção dos manuscritos e a construção do conhecimento desejado nesta pesquisa, adota-se o *ProKnow-C* (*Knowledge Development Process - Constructivist*) [13], que envolve procedimentos para a escolha de artigos associados ao tema [12]. A seleção da estratégia de pesquisa, incluindo a escolha das palavras-chave, representa o ponto inicial e é uma das etapas mais cruciais. Uma decisão inadequada nesse passo pode ter um impacto significativo em todo o desdobramento da pesquisa. Para evitar tais desvios, é imperativo realizar uma análise preliminar.

Assim, concentrando-se em textos acadêmicos, a busca utilizou termos como “uso de materiais recicláveis na construção civil” ou “uso de resíduos sólidos na construção civil”, tanto em português quanto em inglês. No entanto, grande parte dos textos identificados estão na língua inglesa, visto que se trata de um tema muito pouco explorado no Brasil. A investigação teve lugar em 10 de fevereiro de 2024 e abrange artigos de qualquer tipo publicados no período entre 2019 e 2024, encontrados nas bases de dados *Science Direct*, *Scopus*, *Scielo* ou *Web of Science*, todas elas indexadas no site da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) [14]. Além disso, os resultados da RSL são ordenados por relevância e atribuídos apenas às áreas subjetivas à Engenharia.

¹ São denominados resíduos sólidos urbanos as sobras de determinados produtos das atividades doméstica e comercial das povoações, seja a embalagens, cascas ou outras partes do processo, que podem ser reutilizados ou reciclados.

3. Discussão

3.1 Aplicações

A reciclagem de resíduos sólidos urbanos diminui os impactos ambientais por não empregar matéria prima extraída diretamente da natureza e possibilita a abertura de uma variedade de postos de trabalho. Em países como Índia, Gana, Quênia, dentre tantos outros, a reutilização de materiais como vidro moído e determinados tipos de plástico é largamente aplicada na produção de elementos da construção, desde blocos de pavimentação a telhas [2,3,4].

O baixo índice de reciclagem dos dois materiais - vidro 21% e plásticos 9% em relação à produção de cada um [5,6] - as tecnologias para aplicação na construção civil são ainda muito incipientes. No presente trabalho, pretende-se apresentar uma revisão literária acerca de experiências realizadas para o reaproveitamento de vidro moído e de alguns tipos de plástico, sobretudo aqueles contaminados e que não podem ser reciclados, em um compósito a ser empregado como material na produção de materiais da construção civil.

O artigo de Perea *et al.* [5], *Cementless building materials made from recycled plastic and sand/glass: a review and road map for the future*², é também uma revisão da literatura sobre a tecnologia, desafios, qualidade e propriedades do compósito plástico-areia, para uso como material na produção de elementos de construção.

Os autores [5] destacam que as características das matérias-primas, como densidade, resistência e proporção, têm um impacto direto no resultado. Além disso, ressaltam a importância da limpeza e trituração da matéria-prima, que também influenciam o produto. Em suas experiências, alguns autores optaram por usar apenas plásticos "macios", como o polietileno de baixa densidade (PEBD) e o polipropileno (PP), enquanto outros utilizaram uma variedade de tipos, como polietileno de alta densidade (PEAD), politereftalato de etileno (PET), poliestireno (PS) e policloreto de vinila (PVC). Como já observado, fatores como presença de impurezas, dimensão das partículas e porcentagem também foram relevantes nos processos.

Os autores [5] utilizaram areias provenientes de fundição, naturais (lavadas) e vidro moído. Essas areias foram previamente classificadas por meio de análise de peneira, e suas proporções (em peso) variaram entre 10% e 85,7%.

Os processos empregados para a fabricação do material compósito compreenderam desde procedimentos bem rudimentares como a utilização de uma panela para derreter o plástico previamente triturado e, em seguida, adicionar a areia peneirada, até o uso de equipamentos como extrusora.

Alguns experimentos destacaram as propriedades mecânicas dos produtos. De acordo com Perera *et al.* [3], os tipos de plástico e as impurezas não afetaram a densidade ou a resistência do compósito. A resistência à compressão dos materiais produzidos assemelha-se à do concreto³ 20 ou 25 e é superior à dos típicos blocos de pavimentação feitos com areia de cimento Portland.

² "Materiais de construção sem cimento feitos de plástico reciclado e areia/vidro: uma revisão e um roteiro para o futuro", tradução nossa.

³ 20 ou 25 é o número que expressa o Fck (do inglês, *Feature Compression Know*) traduzida para português como Resistência Característica do Concreto à Compressão. O concreto Fck 20 é normalmente empregado em meio agressivo fraco, normalmente em meio rural; o concreto Fck 25 é mais utilizado em meio urbano, indicado desde construções pequenas às grandes construções por sua resistência a agressividade moderada.

Os autores enfatizam que, quanto maior a proporção de carga e ligante, maior é a resistência à compressão do compósito, chegando a 80% de carga. As matérias-primas e produtos do compósito plástico-areia utilizados por Perera et al. [3] estão demonstrados na Figura 1.

Outro artigo considerado relevante para o tema, *Manufacturing of brick by waste plastic*, elaborado por Verma et al. [3], consiste na descrição dos materiais e métodos utilizados na fabricação de tijolos a partir de plástico e areia lavada. Esses autores [3] utilizaram polietileno de baixa densidade (LDPE), poliestireno (PS), polietileno de alta densidade (HDPE) e éter polifenileno (PPE) juntamente com areia nas proporções 1:1, 1:1.5, 1:3, por peso. O método usado consistiu em derreter o plástico em um recipiente e misturar a areia.

Após a secagem das amostras, foram conduzidos ensaios de compressão, absorção de água, eflorescência, dureza e solidez. Neste sentido foi constatado que a amostra com traço 1:1.5 tinha a maior resistência à compressão, bem como a menor absorção de água. Entretanto, não foram apresentados dados separados sobre os ensaios de eflorescência, dureza e solidez de cada amostra.

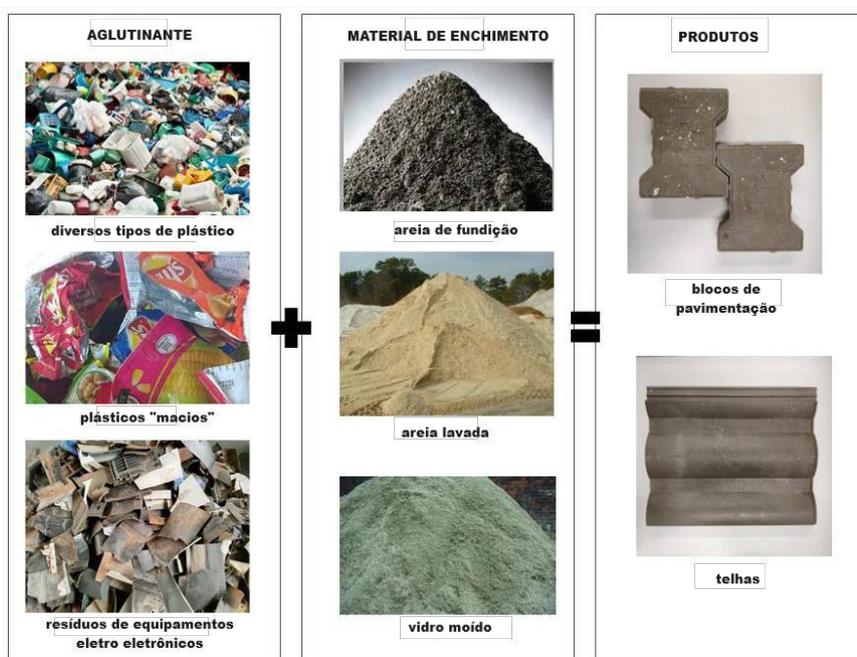


Figura 1: Matérias primas e produtos do compósito plástico-areia. Fonte: Perera et al., 2022 (modificado pelos autores).

Quando comparados com tijolos feitos de barro, os autores constataram que a resistência dos tijolos feitos a partir da mistura de plástico e areia (Figura 2) é 40% superior; e, em relação à absorção de água, cerca de 98% inferior. Os autores também destacam que os tijolos de plástico são mais econômicos e muito mais leves que os tijolos tradicionais, além de serem uma alternativa para a reutilização de plásticos.

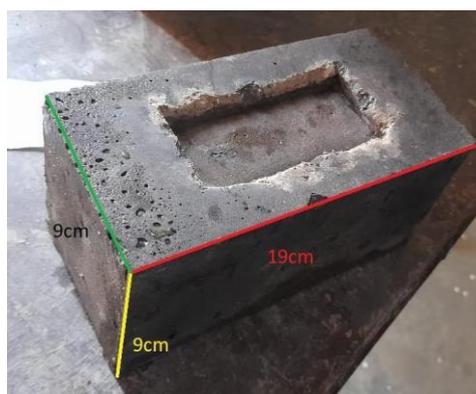


Figura 2: Tijolo feito de plástico e areia. Fonte: Verma *et al.*, 2022.

No trabalho de Chauhan *et al.* [4] intitulado *Fabrication and testing of plastic sand brick*⁴, bem similar ao anteriormente mencionado, utilizou plástico e areia em proporções diferentes para produção de tijolos (Figura 3). No entanto, apenas o plástico tereftalato de polietileno (PET) foi utilizado, misturado à areia em proporções de 1:2, 1:3 e 1:4.

Para a fabricação dos tijolos, as garrafas foram cortadas em pedaços e colocados no tambor para derreter; quando a temperatura atingiu entre 180°C e 200°C, a areia foi adicionada. As misturas foram colocadas em moldes e o período de secagem foi de 24 horas.



Figura 3: Tijolo de areia plástica após removê-lo do molde. Fonte: Chauhan *et al.*, 2019.

Após esse período foram realizados ensaios de resistência à compressão, de absorção de água, eflorescência e resistência ao fogo. Os resultados revelaram que a resistência à compressão das amostras, independente do traço, é elevada se comparada aos tijolos de barro convencionais (considerando o mesmo tamanho e peso); a absorção de água é bastante inferior - entre 0,9% e 4,5%, enquanto os tijolos de argila é cerca de 15% a 20% do peso do tijolo.

Contudo, a resistência ao fogo é apontada pelos autores como ainda inconclusiva, mas inicialmente os tijolos poderiam ser utilizados para caixas d'água, tanques e obras onde se prevê a contenção de água.

⁴ “Fabricação e teste de tijolos de areia plástica”, tradução nossa.

3.2. Resultados

Os ensaios conduzidos pelos autores mencionados, identificados por meio da RSL, revelaram melhorias gerais nas propriedades dos produtos finais. Por exemplo, o compósito de vidro moído e plástico demonstrou resistência à compressão superior à dos blocos feitos com cimento Portland. No entanto, os autores alertam para sua suscetibilidade a danos ambientais causados pela radiação ultravioleta, bem como sua baixa resistência ao fogo.

Por outro lado, tanto Verma *et al.* (2022) quanto Chauhan *et al.* (2019) destacam que, além da resistência à compressão, os tijolos também se destacam por serem mais leves e terem percentuais significativamente menores de absorção de água em comparação com os tijolos tradicionais feitos de barro.

Uma observação interessante feita por Verma *et al.* (2022) refere-se à abundância de resíduos de plástico em todo o mundo, tornando a reciclagem uma necessidade urgente. Nesse sentido, apesar de os diversos tipos de resíduos sólidos serem extremamente poluentes, sua utilização como matéria-prima na construção civil é não apenas viável, mas também crucial.

4. Considerações Finais

Em linhas gerais, o aumento contínuo do descarte de resíduos sólidos urbanos é um problema global. Além de afetar a saúde pública e o meio ambiente, esse cenário ressalta a necessidade urgente de soluções eficazes. No entanto, a reciclagem, embora vista como uma alternativa promissora, ainda é praticada de forma limitada. Neste trabalho, fez-se uma revisão sistemática da literatura a fim de identificar boas alternativas desenvolvidas para a utilização de plástico e vidro na fabricação de elementos da construção civil.

Fatores como a falta de cultura de reciclagem, políticas públicas inadequadas e fiscalização insuficiente contribuem para índices mínimos de reciclagem efetiva. Em um contexto de consumo crescente, com aumento na produção de embalagens, a quantidade de resíduos sólidos urbanos tende a se agravar.

A utilização de materiais como vidro moído e diversos tipos de plástico, amplamente disponíveis em todo o mundo, surge como uma alternativa sustentável em várias frentes. Além de reduzir a acumulação de resíduos em aterros e oceanos, essa prática minimiza as emissões de gases de efeito estufa e preserva os recursos naturais. Socialmente, ela cria novas oportunidades de emprego, enquanto economicamente contribui para um setor amplo e diversificado.

Referências

- [1] KAZA, Silpa; YAO, Lisa; BHADA-TATA, Perinaz; VAN WOERDEN, Frank. What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050. International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank, 2018. Disponível em: <https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/>. Acesso em: 03, mar. 2024.
- [2] WORLD WIDE FUND FOR NATURE. **Plastics**, s/d. Disponível em: <https://www.worldwildlife.org/initiatives/plastics>. Acesso em: 23, jun. 2024.
- [3] PRADHA, S. Subha; SARANYA, K. Recycling plastic waste into construction materials for sustainability. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 1210, 2023. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755->

[1315/1210/1/012016/pdf#:~:text=Various%20applications%20of%20the%20plastic,of%20reinforcement%20and%20infrastructure%20developments.](#) Acesso em: 21, mai. 2024.

[4] TULASHIE, Samuel Kofi; BOADU, Enoch Kofi; KOTOKA, Francis; MENSAH, David. Plastic wastes to pavement blocks: a significant alternative way to reducing plastic wastes generation and accumulation in Ghana. **Construction and Building Materials**, v. 241, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S245222362300010X>. Acesso em: 21, mai. 2024.

[5] WANGECI, Maryam. **Building from plastic waste: opportunities and limitations in Kenya**. 2023. 159f. Monografia (Bacharelado em Arquitetura) - Department of Architecture and Interior Design, Kenyatta University, Nairobi, 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Maryam-Wangeci/publication/377850069_ARCHITECTURAL_THESIS-_BUILDING_FROM_PLASTIC_WASTE_OPPORTUNITIES_AND_LIMITATIONS_IN_KENYA/links/65bb1f031bed776ae31b142f/ARCHITECTURAL-THESIS-BUILDING-FROM-PLASTIC-WASTE-OPPORTUNITIES-AND-LIMITATIONS-IN-KENYA.pdf. Acesso em: 22, mai. 2024.

[6] HARDER, Joachim. Glass recycling: current market trends. **Recovery: Recycling Technology Worldwide**, v.5, 2018. Disponível em: <https://www.recovery-worldwide.com/en/artikel/glass-recycling-current-market-trends-3248774.html>. Acesso em: 24, mai. 2024.

[7] UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME. **Why aren't we recycling more plastic?** 2023. Disponível em: <https://stories.undp.org/why-arent-we-recycling-more-plastic#:~:text=Recycling%20rates%20vary%20by%20location,Some%2012%20percent%20is%20incinerated>. Acesso em: 24, mai. 2024.

[8] PERERA, Jude Shalitha; MENDIS, Priyan; BADUGE, Shanaka Kristombu; HASHEMI, Mahak. Cementless building materials made from recycled plastic and sand/glass: a review and road map for the future. **Electronic Journal of Structural Engineering**, v.22, n.3, p.56-63, out. 2022. Disponível em: <https://ejsei.com/EJSE/article/view/377>. Acesso em: 20, mar. 2024.

[9] VERMA, Anubhav; SRIVASTAVA, Abhay; RAY, Brijesh Kumar; YADAV, Deepak. Manufacturing of Brick by Waste Plastic. **International Journal of Engineering Research in Mechanical and Civil Engineering (IJERMCE)**, v. 9, n.6, jun. 2022. Disponível em: https://www.technoarete.org/common_abstract/pdf/IJERMCE/v9/i6/Ext_68459.pdf. Acesso em: 17, mar. 2024.

[10] CHAUHAN, S. S.; KUMAR, Bhushan; SINGH, Prem Shankar; KHAN, Abuzaid; GOYAL, Hritik; GOYAL, Shivank. Fabrication and Testing of Plastic Sand Bricks. In: International Conference on Computational & Experimental Methods in Mechanical Engineering, 2, 2019, GL Bajaj Institute of Technology and Management, Greater Noida, India. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. Disponível em: [Fabrication and Testing of Plastic Sand Bricks - IOPscience](#). Acesso em: 17, mar. 2024.

[8] ISWA. International Solid Waste Association. News. ISWA, 2024. Disponível em: <https://www.iswa.org/news/?v=19d3326f3137> Acesso em: 23, mai. 2014.

- [9] GLASS RECYCLING COALITION. Webinars. Glass Recycling Coalition, 2024. Disponível em: <https://www.glassrecycles.org/webinars/>. Acesso em: 23 maio 2024.
- [10] ABREMA. Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. **Panorama 2023**: Parte 1. ABREMA, 2023. Disponível em: https://www.abrema.org.br/pdf/Panorama_2023_P1.pdf. Acesso em: 23 maio 2024.
- [11] AZEVEDO, R. C. et al. **Systematic Review for Engineering and Experiments (SREE)**. In: Notes from the Research Methodology Course. Belo Horizonte, Brazil: 1st ed.; PPGEC/CEFET-MG, 2022.
- [12] AFONSO, M. H. F. et al. Como construir conhecimento sobre o tema de pesquisa? Aplicação do processo ProKnow-C na busca de literatura sobre avaliação do desenvolvimento sustentável. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, vol. 5, no. 2, Feb. 2012. DOI: 10.5773/rgsa.v5i2.424.
- [13] AZEVEDO, R. C.; ENSSLIN, L.; JUNGLES, A. E. A Review of Risk Management in Construction: **Opportunities for Improvement**. **Modern Economy**, vol. 05, no. 04, pp. 367–383, 2014. DOI: 10.4236/me.2014.54036.
- [14] CAPES. Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. Acesso CAFE. Periódicos CAPES. Disponível em: <https://www-periodicos-capes-gov-br.ezl.periodicos.capes.gov.br/index.php?>. Acesso em: 09 dez. 2023

Revisão Sistemática sobre Avaliação dos Impactos das Hidrelétricas na Qualidade de Água da Bacia do Rio Itabapoana - Região Hidrográfica IX

Assessment of the Impacts of Hydroelectric Power Plants on the Water Quality of the Itabapoana River - Hydrographic Region IX

Flávia Chrysóstomo Silva – Doutoranda, Instituto Federal Fluminense/AmbHidro.

flavia.chrysostomo@gsuite.iff.edu.br

Thiago Moreira de Rezende Araújo – Doutor, Instituto Federal Fluminense/AmbHidro.

thiago_uenf@yahoo.com.br

Vicente de Paulo Santos de Oliveira – Doutor, Instituto Federal Fluminense/AmbHidro.

vicentepsoliveira@gmail.com

Resumo

O estudo consiste em uma revisão sistemática baseada em trabalhos científicos publicados, com objetivo de identificar os parâmetros mais utilizados na avaliação dos impactos ambientais causados após a implantação de hidrelétricas, em especial relacionados à qualidade da água. As buscas das informações científicas foram feitas nas bases Scopus, Web of Science, IEEE e EBSCO. Os parâmetros mais frequentes em análises físico-químicas de amostras de água nos estudos avaliados foram pH, temperatura e oxigênio dissolvido. Os parâmetros microbiológicos foram coliformes (totais, fecais e termotolerantes), bactérias aeróbias e anaeróbias.

Palavras-chave: Impacto sinérgico; Parâmetros da água; Impacto ambiental

Abstract

The study consists of a systematic review based on published scientific works, with the objective of identifying the parameters most used in the assessment of environmental impacts caused after the implementation of hydroelectric plants, especially those related to water quality. The searches for scientific information were carried out in the Scopus, Web of Science, IEEE and EBSCO databases. The most frequent parameters in physical-chemical analyzes of water samples in the studies evaluated were pH, temperature and dissolved oxygen. The microbiological parameters were coliforms (total, fecal and thermotolerant), aerobic and anaerobic bacteria.

Keywords: Synergistic impact; Water parameters; Environmental impact

1. Introdução

A energia hídrica sempre foi a principal fonte de fornecimento de energia elétrica no Brasil. Devido às primeiras necessidades energéticas do desenvolvimento industrial e urbano, principalmente no estado do Rio de Janeiro, no início do século XX, foram feitos os primeiros investimentos na construção de barragens e as usinas vieram a compor o complexo produtor de energia da Light SA, caracterizado pela transposição de água do Rio Paraíba Sul para o Rio Guandu (CERHI & INEA, 2014b).

Há muito se fala que a produção de energia através de hidrelétricas não gera impactos ambientais negativos no meio ambiente, mas muitos estudos têm demonstrado que essa forma de geração de energia, antes considerada “energia limpa”, pode causar sérios impactos ambientais não apenas durante a construção, como também durante o funcionamento (INATOMI e UDAETA, 2011).

Entre os problemas ambientais identificados e amplamente conhecidos tem-se a alteração da paisagem, seja pela instalação de usinas hidrelétricas e represas, como também pelas linhas de transmissão de energia; o manejo inadequado de resíduos sólidos e líquidos, as alterações dos parâmetros físicos, químicos e biológicos das águas; a interrupção do fluxo dos cursos de água e diminuição da vazão através da instalação de barragens e represas; a geração de campos magnéticos pelas torres de alta tensão, contaminação sonora, desmatamento e os riscos de deslizamento. A construção de represas pode ter impactos ambientais, sociais e econômicos nas áreas de influência, causando alterações na vida aquática e terrestre, além de afetar a cultura e a riqueza histórica da região (GIUSTI, 2005).

A qualidade da água é definida por sua composição e pelo conhecimento do efeito que seus constituintes podem causar no meio ambiente e na saúde dos seres humanos, os diferentes usos da água exigem diferentes padrões de qualidade. A Resolução nº 357/2005 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) traz as diretrizes para a realização do enquadramento dos corpos hídricos, onde a água doce é dividida em classes, quanto maior o número da classe, menos restritivo é o uso a que ela pode se destinar (CINTRA et al, 2020).

O Instituto Estadual do Ambiente (INEA) realiza o monitoramento qualitativo e quantitativo, a nível estadual. Para auxiliar sua gestão, as regiões hidrográficas do Estado do Rio de Janeiro foram divididas em nove Regiões Hidrográficas, de acordo com a Resolução CERHI-RJ nº 107 de 22 de maio de 2013, a porção fluminense da bacia do Rio Itabapoana foi incluída, bem como o município de Bom Jesus do Itabapoana.

Há que se considerar os benefícios gerados pelas hidrelétricas, no entanto é preciso ter conhecimento e dimensionamento dos impactos causados desde a fase de implantação até a sua operação. Considerando o alto potencial energético desta região, este trabalho realiza uma revisão sobre os impactos gerados pela construção das hidrelétricas e busca responder algumas questões para auxiliar na pesquisa desenvolvida na Bacia do Rio Itabapoana - Região Hidrográfica IX:

- Quais as ferramentas utilizadas para avaliação da qualidade da água com o impacto da instalação das hidrelétricas?
- Quais métodos utilizados para avaliação da qualidade da água com o impacto das instalações das hidrelétricas?
- Quais foram os principais parâmetros de qualidade de água analisados na avaliação da qualidade da água para avaliar o impacto das instalações das hidrelétricas?

2. Procedimentos Metodológicos

O estudo pretende identificar os impactos ambientais sinérgicos a partir do funcionamento de hidrelétricas. Para alcançar tal objetivo utilizou-se da revisão de literatura, identificando as principais perspectivas sobre o assunto.

O processo de revisão de literatura demanda uma síntese dos tópicos e conhecimentos abordados nos estudos, a fim de permitir a compreensão sobre o conhecimento. A revisão da literatura é o início da construção do conhecimento científico, pois é através desse processo que são elaboradas novas teorias, são identificadas lacunas e oportunidades para pesquisas num assunto específico (BOTELHO; CUNHA; MACEDO, 2011).

O método utilizado nesta pesquisa foi baseado em uma revisão sistemática, a partir da elaboração de perguntas, bem como do uso do anagrama PICOC (*Population Intervention Comparison Outcome Context*) O estudo foi feito a partir do levantamento de dados realizados no espaço temporal entre 2010 e 2021 (11 anos), visando analisar pesquisas mais recentes e eliminar estudos já ultrapassados.

Para a seleção literária científica, inicialmente foram escolhidas as bases de pesquisa Scopus, Web of Science, IEEE e EBSCO e definidas as palavras-chave hidrelétrica, modelagem, qualidade da água e impacto ambiental.

Em seguida definiu-se o tesouro ("water quality") AND ("environmental impact") AND ("hydroelectric") e realizou-se as buscas nas bases de pesquisa. Na Tabela 1 estão os resultados encontrados em cada base.

Tabela 1 - Quantitativo de trabalhos por base de pesquisa.

Nome	URL	Quantidade
Scopus	http://www.scopus.com	139
Web of Science	http://www.webofscience.com	13
Biblioteca Digital IEEE	https://ieeexplore.ieee.org	4
EBSCO	https://www.ebsco.com	11
TOTAL		167

Fonte: Autores.

Após a obtenção dos dados, os trabalhos foram analisados com o auxílio do Parsifal (Perform Systematic Literature Reviews) e planilhas eletrônicas contidas no software Excel (MICROSOFT OFFICE,2010). Com auxílio de ambos, foi possível fazer a análise de exclusão e identificação de duplicatas.

Os critérios de inclusão utilizados foram trabalhos completos na área de estudo, idiomas português, inglês e espanhol. E os critérios de exclusão foram trabalhos sem acesso completo, estudos anteriores a 2010, temas diferentes da área de estudo, idiomas diferentes de português, inglês e espanhol.

Dessa forma, utilizando os critérios de elegibilidade, foram selecionados os trabalhos a serem lidos completamente. Logo após, foram elaboradas as tabelas de localização e intervenção.

Na Figura 1 é apresentado o prisma dos passos metodológicos adotados.

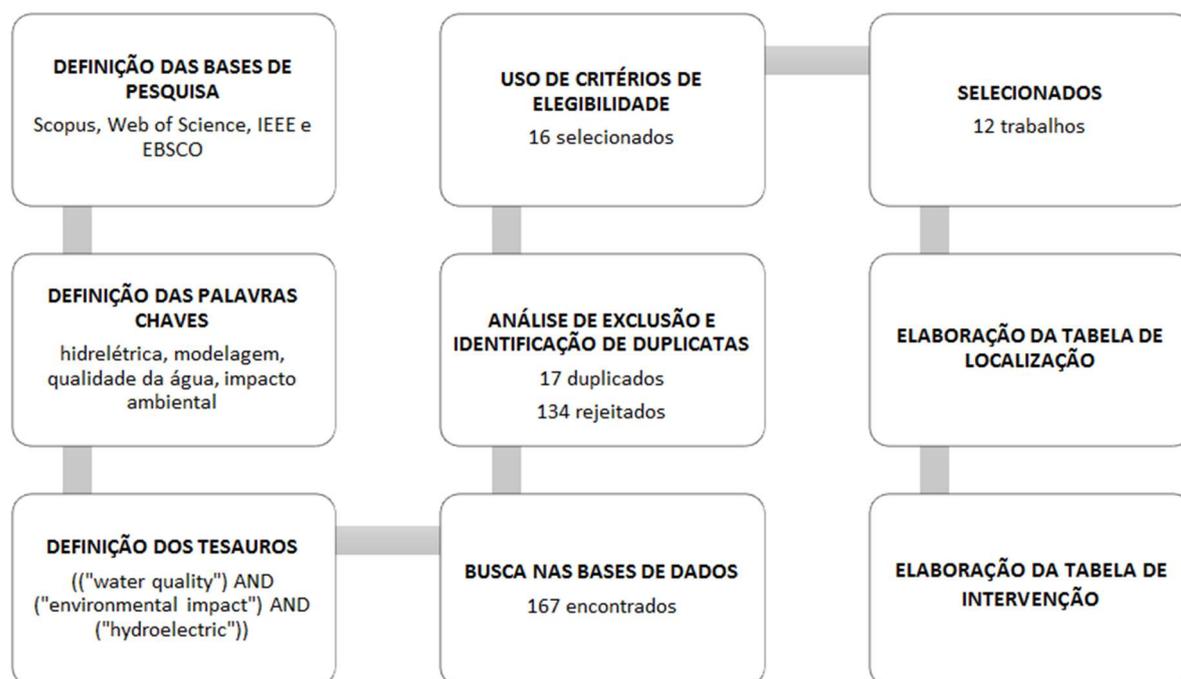


Figura 1 - Fluxograma da metodologia adotada. Fonte: Elaborada pelos autores.

3. Resultados

3.1. Resultados Qualitativos e Quantitativos

A análise das obras incluídas nesta revisão permitiu a obtenção de um panorama descritivo das publicações mais relevantes indexadas às bases de dados Web of Science, IEEE e EBSCO. Na Tabela 2, são apresentadas informações gerais sobre os estudos incluídos na análise.

Tabela 2 - Localização dos Artigos.

N	Título	Ano	Autor	Local	Instituição	Quantil
1	Water parameters evolution in a hydroelectric site	2010	Bucur, D.M. and Bunea, F. and Ciocan Dan, G. and Băran, G. and Isbășoiu, E.C.	Romênia	Environmental Romênia E.C. Engineering and Management	Q3
2	Hydroelectric potential and environmental effects of multistage hydropower projects in Turkey	2010	Mehmet Berkun	Turquia	Energy for Sustainable Development	Q1
3	A review of the potential water quality impacts of tidal renewable energy systems	2012	Kadiri, M. and Ahmadian, R. and Bockelmann-Evans, B. and Rauen, W. and Falconer, R.	Reino Unido	Renewable and Sustainable Energy Reviews	Q1
4	Hydropower in Brazil: Overview of positive and negative environmental aspects	2012	Von Sperling, E.	Brasil	Energy Procedia	N/A

5	Avaliação do Impacto de Pequena Central Hidrelétrica na Qualidade de Água do Rio Itabapoana Através de um Modelo Computacional	2016	Lugon Jr, Jader and Ribeiro Costa, Victor Thauan and Watts Rodrigues, Pedro Paulo Gomes	Brasil	Revista Ciência e Natura	N/A
6	Qualidade da Água do rio Itabapoana: Boletim do Análise dos Parâmetros Físico-Químicos e Microbiológicos e Influência de Empreendimentos Hidrelétricos	2017	Ednilson Gomes Souza Junior, Vicente De Paulo Santos de Oliveira	Brasil	Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego	N/A
7	Qualidade da água e índice trófico em rio de ecossistema tropical sob impacto ambiental	2017	Medeiros de Abreu, Carlos Henrique and Cunha, Alan Cavalcanti	Brasil	Engenharia Sanitária e Ambiental	Q3
8	The Environmental Impact Study of Micro Hydro Power in Pekalongan Indonesia	2018	Suwarto and Hadi, S.P. and Hermawan	Indonésia	E3S Web of Conferences	N/A
9	Hydroelectricity In Nigeria: A Review Of The Associated Environmental Impact	2019	Aboi, Godwin and Ali, Nyangwarimam Obadiah and Ukiwe, Ezechukwu Kalu and Thomas, Sadiq and Oshiga, Omotayo and Jonathan, Dangwaran B.	Nigéria	International Conference on Electronics, Computer and Computation	N/A
10	Evidence-based indicator approach to guide preliminary environmental impact assessments of hydropower development	2020	McManamay, R.A. and Parish, E.S. and DeRolph, C.R. and Witt, A.M. and Graf, W.L. and Burtner, A.	Estados Unidos	Journal of Environmental Management	Q1
11	Simulating Hydropower Discharge using Multiple Decision Tree Methods and a Dynamical Model Merging Technique	2020	Yang, T. and Liu, X. and Wang, L. and Estados Bai, P. and Li, J.	Estados Unidos	Journal of Resources Planning and Management	Q1
12	Shaping changes in the ecological status of watercourses within barrages with hydropower schemes	2020	Tomczyk, P. and Wiatkowski, M.	Polónia	Archives of Environmental Protection	Q2

Fonte: Autores.

Os parâmetros de qualidade da água analisados, os métodos e as ferramentas utilizadas nos trabalhos científicos da revisão sistemática estão listados na Tabela 3.

Tabela 3 – Intervenção dos artigos.

N	Autor	Método utilizado	Ferramentas utilizadas	Parâmetros analisados
1	Bucur, D.M. and Bunea, F. and Ciocan Dan, G. and Băran, G. and Isbăsoiu, E.C.	Coleta de amostras e ensaios	Análises laboratoriais	Oxigênio dissolvido, pH, cloro e manganês
2	Mehmet Berkun	Pesquisa Bibliográfica	Revisão de literatura	Parâmetros econômicos, sociais e ambientais, emissão de carbono, transporte de sedimentos, vazão
3	Kadiri, M. and Ahmadian, R. and Bockelmann-Evans, B. and Rauen, W. and Falconer, R.	Modelagem	Modelo Bidimensional, Ensaios Laboratoriais	Oxigênio dissolvido, salinidade, concentração de sedimentos em suspensão, nutrientes, metais e patógenos
4	Von Sperling, E.	Pesquisa Bibliográfica	Revisão de literatura	Turbidez, transparência da água, sedimentação de nutrientes, processos de eutrofização, emissões de CO ₂ , CH ₄ e N ₂ O
5	Lugon Jr, Jader and Ribeiro Costa, Victor Thauan and Watts Rodrigues, Pedro Paulo Gomes	Modelagem	MOHID GIS	Amônia, clorofila e oxigênio dissolvido
6	Ednilson Gomes Souza Junior, Vicente De Paulo Santos de Oliveira	Coleta de amostras e ensaios	Análises laboratoriais	Oxigênio dissolvido, sólidos totais disponíveis, turbidez, pH, condutividade elétrica e coliformes termotolerantes
7	Medeiros de Abreu, Carlos Henrique and Cunha, Alan Cavalcanti	Coleta de amostras e ensaios	Análises laboratoriais	Oxigênio dissolvido, cor, turbidez, condutividade elétrica, NH ₃ P, pH, SO ₄ ²⁻ , Mg ²⁺ , Cl ⁻ , coliformes termotolerantes (CT) <i>Escherichia coli</i> e <i>Clorofila-a</i> , <i>E. Coli</i>
8	Suwarto and Hadi, S.P. and Hermawan	Método Qualitativo	Entrevistas, observações e análises laboratoriais	pH, oxigênio dissolvido, nitrogênio, temperatura, ruído
9	Aboi, Godwin and Ali, Nyangwarimam Obadiah and Ukiwe, Ezechukwu Kalu and Thomas, Sadiq and Oshiga, Omotayo and Jonathan, Dangwaran B.	Método Qualitativo	Entrevistas, questionários e observações	Inundações, impacto da fauna e da vida aquática, oxigênio dissolvido, presença de poluentes na água, emissão de observações gases
10	McManamay, R.A. and Parish, E.S. and DeRolph, C.R. and Witt, A.M. and Graf, W.L. and Burtner, A.	Método Qualitativo	Questionários com protótipo de suporte à decisão	Presença de algas, oxigênio dissolvido, temperatura, emissão de gases, turbidez, condutividade, nutrientes e material orgânico, gases dissolvidos, biodiversidade, vegetação

11	Yang, T. and Liu, X. and Wang, L. and Estados Bai, P. and Li, J.	Método de tomada de decisão	Método Dmerge	Temperatura, oxigênio dissolvido e turbidez da água
12	Tomczyk, P. and Wiatkowski, M.	Pesquisa Bibliográfica	Revisão de literatura	Vazão, processos erosivos, teor de oxigênio dissolvido, temperatura e turbidez

Fonte: Autores.

Na Figura 2 foram relacionados os trabalhos por ano. Observa-se que o ano que aconteceram mais publicações sobre o tema foi 2020. Em 2017 e 2012 também houve uma quantidade relevante de publicações. Já entre 2013 e 2015, apenas um artigo foi publicado.

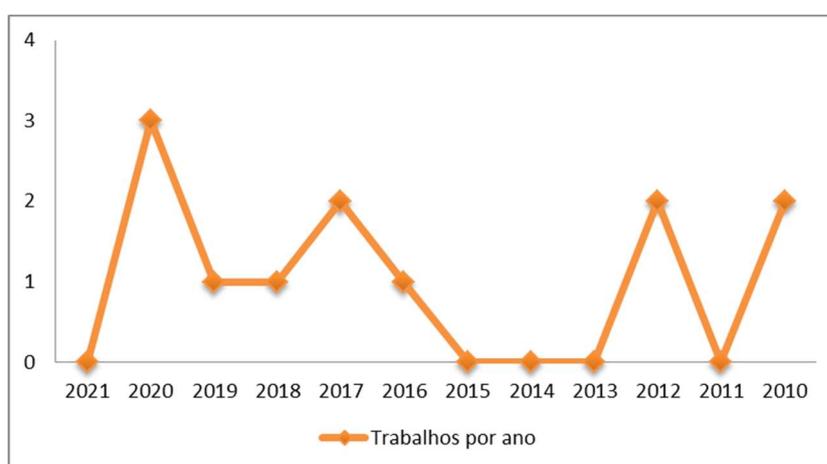


Figura 2 - Quantitativo de trabalhos por ano. Fonte: Elaborada pelos autores.

Esta revisão sistemática analisou artigos de diferentes regiões do mundo. Pode-se ter uma visão geral das pesquisas realizadas em cada país, conforme mostrado na Figura 3. Analisando-se é possível observar uma maior concentração de pesquisas desenvolvidas no Brasil, onde a principal fonte de energia é hidráulica, proveniente das usinas hidrelétricas.

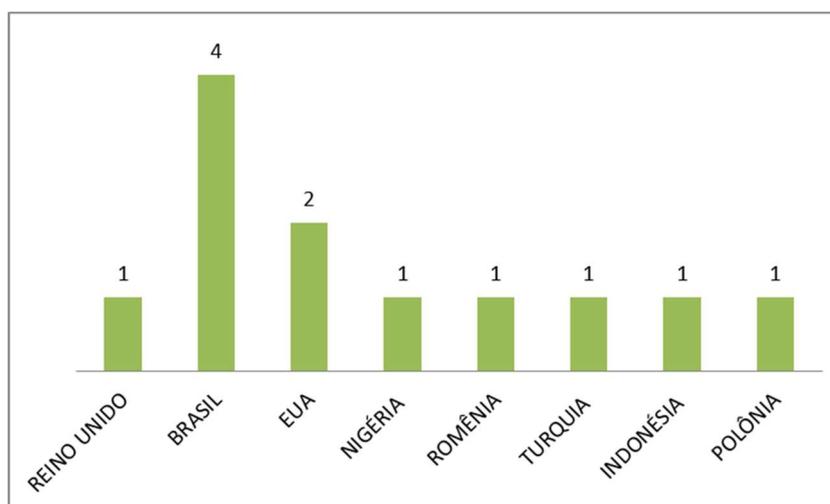


Figura 3 - Quantitativo de trabalhos por país. Fonte: Elaborada pelos autores.

4. Conclusões

A partir dos dados observacionais e dos resultados analisados na revisão sistemática, pode-se concluir que o impacto da construção da usina hidrelétrica é significativo e cabe aos gestores do empreendimento fazer uso racional desses recursos, pois o impacto global pode ser minimizado através de um planejamento e execução sustentáveis.

Os problemas ambientais identificados foram modificação da paisagem, manejo inadequado de resíduos sólidos e líquidos, alterações dos parâmetros físicos, químicos e biológicos das águas, interrupção do fluxo dos cursos de água e diminuição da vazão através da instalação de barragens e represas, geração de campos magnéticos pelas torres de alta tensão, poluição sonora, desmatamento e os riscos de deslizamento.

Em relação às ferramentas empregadas para a avaliação da qualidade da água, foram ensaios laboratoriais, modelos computacionais e revisão de literatura. Os métodos para a avaliação dos parâmetros da qualidade da água incluíram coletas de amostras, ensaios, modelagem e pesquisa bibliográfica.

Dentre os trabalhos selecionados para a elaboração da presente pesquisa, concluiu-se que os principais parâmetros analisados para avaliar os impactos ambientais das hidrelétricas na qualidade da água são oxigênio dissolvido, temperatura, turbidez, pH, coliformes (totais, fecais e termotolerantes), bactérias aeróbias e anaeróbias.

Referências

- [1] BOTELHO, L. L. R.; CUNHA, C. C. A.; MACEDO, M. O método da revisão integrativa nos estudos organizacionais. *Revista Eletrônica Gestão e Sociedade*, Belo Horizonte, v. 5, n. 11, p. 121–136, 2011. Disponível em: <https://www.gestoesociedade.org/gestoesociedade/article/view/1220>. Acesso em: 10 dez. 2021.
- [2] CINTRA, L. S., OLIVEIRA, C. R. de, COSTA, B.B.P., COSTA, D.A., OLIVEIRA, V.P.S., ARAÚJO, T.M.R. (2020). Monitoramento de parâmetros de qualidade da água do Rio Paraíba do Sul em Campos Dos Goytacazes – RJ. *Holos*. 36(5), 1-16.
- [3] Conselho Estadual de Recursos Hídricos – CERHI; Instituto Estadual do Ambiente – INEA. Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Rio de Janeiro. Documento elaborado pela Fundação Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos - COPPETEC. Laboratório de Hidrologia e Estudos Ambientais (LabHid). Rio de Janeiro: LabHid, 2014a.
- [4] GIUSTI, M. del C. H. Conflictos Ambientales en la Gestión del Santuario Historico de Machupicchu: El Caso de la Instalación y Manejo de la Central Hidroeléctrica Machupicchu. 2005. 189f. Tese (Master en Ciencias Sociales con Mencion en Gestion Ambiental y Desarrollo)- Escuela Andina de Post-Grado Maestria en Gestion Ambiental y Desarrollo. Cusco, 2005.
- [5] INATOMI, T. A. H.; UDAETA, M. E. M. Análise Dos Impactos Ambientais na Produção de Energia Dentro do Planejamento Integrado de Recursos. Seção de estudos estratégicos de energia e de desenvolvimento sustentável do GEPEA/EPUSP, p. 14. 2011.
- [6] Instituto Estadual do Ambiente (INEA). Gestão da Qualidade das Águas. Acessado em 27 de maio de 2021 em: <http://www.inea.rj.gov.br/ar-agua-e-solo/qualidade-das-aguas-por-regiao-hidrografica-rhs/>
- [7] Lei Estadual nº 3.239, de 2 de agosto de 1999, institui a Política Estadual de Recursos Hídricos, cria o Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Acessado em 27 de maio de 2021 em: <http://alerjln1.alerj.rj.gov.br/CONTLEI.NSF/b24a2da5a077847c032564f4005d4bf2/43fd110fc03f0e6c032567c30072625b>
- [8] MAGRINI, Alessandra. Metodologia de Avaliação Ambiental. O caso das Usinas Hidrelétricas. Tese de doutorado. Rio de Janeiro, UFRJ, COPPEAD, 1992.
- [9] Resolução CERHI-RJ Nº 107 de 22 de maio de 2013. Aprova nova definição das regiões hidrográficas do Estado do Rio de Janeiro. Acessado em 27 de maio de 2021 em: <http://www.comiteguandu.org.br/conteudo/Resolucao-CERHI-107.pdf>
- [10] Resolução CONAMA n. 357, de 17 de março de 2005 (2005). Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da União. Brasília, DF.
- [11] SOUZA JR, E. G. Análise do Potencial Hidrelétrico e Caracterização Físico-Química e Microbiológica do Rio Itabapoana, Sudeste Brasileiro - Dissertação de Mestrado. IFFluminense, Campos dos Goytacazes/RJ, 2015.

- [12] Abreu, Carlos Henrique Medeiros de e Cunha, Alan Cavalcanti. Qualidade da água e índice trófico em rio de ecossistema tropical sob impacto ambiental. *Engenharia Sanitaria e Ambiental* [online]. 2017, v. 22, n. 01 [Acessado 13 Fevereiro 2022] , pp. 45-56. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1413-41522016144803>>. Epub 13 Out 2016. ISSN 1809-4457. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016144803>.
- [13] Berkun, Mehmet. (2010). Hydroelectric potential and environmental effects of multistage hydropower projects in Turkey. *Energy for Sustainable Development*. 14. 320-329. 10.1016/j.esd.2010.09.003.
- [14] Bucur, Diana & Florentina, Bunea & Ciocan, Gabriel & Baran, Gheorghe & Isbasoiu, Eugen. (2010). Water parameters evolution in a hydroelectric site. *Environmental engineering and management journal*. 9. 1539-1542. 10.30638/eemj.2010.209.
- [15] G. Aboi, N. O. Ali, E. K. Ukiwe, S. Thomas, O. Oshiga and D. B. Jonathan, "Hydroelectricity In Nigeria: A Review Of The Associated Environmental Impact," 2019 15th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO), 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICECCO48375.2019.9043290.
- [16] Junior, Ednilson & Oliveira, Vicente De Paulo. (2017). Qualidade da Água do rio Itabapoana: Análise dos Parâmetros Físico-Químicos e Microbiológicos e Influência de Empreendimentos Hidrelétricos. *Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego*. 11. 29. 10.19180/2177-4560.v11n12017p29-41.
- [17] Kadiri, Margaret & Ahmadian, Reza & Bockelmann-Evans, Bettina & Rauen, William & Falconer, Roger. (2012). A review of the potential water quality impacts of tidal renewable energy systems. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 16. 329-341. 10.1016/j.rser.2011.07.160.
- [18] Lugon Jr, Jader, Thauan Ribeiro Costa, Victor, Gomes Watts Rodrigues, Pedro Paulo Avaliação do Impacto de Pequena Central Hidrelétrica na Qualidade de Água do Rio Itabapoana através de um Modelo Computacional. *Ciência e Natura [em linha]*. 2016, 38(1), 95-105[*data de consulta* 27 de Enero de 2022]. ISSN: 0100-8307. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=467546196008>
- [19] McManamay, Ryan & Parish, Esther & DeRolph, Christopher & Witt, Adam & Graf, William & Burtner, Alicia. (2020). Evidence-based indicator approach to guide preliminary environmental impact assessments of hydropower development. *Journal of Environmental Management*. 265. 110489. 10.1016/j.jenvman.2020.110489.
- [20] Silva, B.L.A.. (2015). Case Study: Hydroelectric Generation Employing The Water Distribution Network In Pato Branco, Brazil. 10.13140/RG.2.1.5072.7529.
- [21] Sperling, Eduardo. (2012). Hydropower in Brazil: Overview of Positive and Negative Environmental Aspects. *Energy Procedia*. 18. 110–118. 10.1016/j.egypro.2012.05.023.
- [22] Suwanto, & Hadi, Sudharto & Hermawan,. (2018). The Environmental Impact Study Of Micro Hydro Power In Pekalongan Indonesia. *E3S Web of Conferences*. 31. 08007. 10.1051/e3sconf/20183108007.
- [23] Tomczyk, Paweł & Wiatkowski, Mirosław. (2020). Shaping changes in the ecological status of watercourses within barrages with hydropower schemes - Literature review. *Archives of Environmental Protection*. 46. 78-94. 10.24425/aep.2020.135767.
- [24] Yang, Tiantian, Liu, Xiaomang, Wang, Lingling, Bai, Peng, and Li, Jingjing. Simulating Hydropower Discharge using Multiple Decision Tree Methods and a Dynamical Model

Merging Technique. United States: N. p., 2020. Web. doi:10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001146.

ANÁLISE DOS IMPACTOS AMBIENTAIS CAUSADOS PELOS RESÍDUOS SÓLIDOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO EM MANAUS – AM

ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL IMPACTS CAUSED BY SOLID CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE IN MANAUS – AM

Leilane Jovina do Nascimento Braga, Graduanda em Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas – IFAM, Campus Manaus Centro.

leilane317@hotmail.com

Brenda de Carvalho Mar, Graduanda em Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas – IFAM, Campus Manaus Centro.

brendacarvalhomar@gmail.com

José Costa Feitoza, Professor Mestre, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas – IFAM, Campus Manaus Centro.

jose.feitoza@ifam.edu.br

Jussara Socorro Cury Maciel, Professora Doutora, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas - IFAM, Campus Manaus Centro.

jussara.maciel@ifam.edu.br

Resumo

A construção civil gera uma grande quantidade de resíduo que poderia ser reaproveitada, reutilizada ou reciclado, visando assim a diminuição de gasto com seu tratamento e o descarte e com a criação de um plano de gerenciamento de resíduos da construção civil de modo que minimize os impactos nos lixões ou no próprio meio ambiente. Neste estudo, realizamos uma análise dos resíduos da construção e demolição (RCD) na construção civil na capital Manaus (AM), abordando o processo de geração e o tratamento desses resíduos. Além disso, apresentamos um levantamento bibliográfico sobre temas relacionados aos resíduos da construção civil e às normas federais, nacionais, estaduais e municipais. Demonstramos que, de forma econômica, é possível promover a sustentabilidade nas empresas por meio de inovações e da redução do impacto ambiental, o que é fundamental.

Palavras-chave: Construção civil; Meio ambiente; Resíduos Sólidos e Sustentabilidade

Abstract

Civil construction generates a large amount of waste that can be reused, reused or recycled, thus reducing spending on treatment and disposal and creating a construction waste management plan to minimize impacts in landfills or in the environment itself. In this study, we carried out an analysis of construction and demolition waste (RCD) in civil construction in the capital Manaus (AM), addressing the process of generation and treatment of this waste. In addition, we present a bibliographical survey on topics related to construction waste and federal, national, state and municipal regulations. We demonstrate that, in an economical way, it is possible to promote sustainability in companies through innovations and reducing environmental impact, which is fundamental.

Keywords: : Construction; Environment; Solid Waste and Sustainability

1. Introdução

O setor da construção civil está cada vez mais envolvido em debates sobre o controle e a responsabilidade na gestão de resíduos sólidos, com referência à Resolução nº 307/2002 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002) [1]. Esta resolução visa definir os deveres e responsabilidades relacionados à destinação adequada dos resíduos sólidos, incentivando o gerenciamento. Conforme dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2021) [2], os municípios coletaram mais de 48 milhões de toneladas de Resíduos da Construção Civil (RCD), um aumento de 2,9% em relação ao ano anterior. A média de coleta por habitante foi de aproximadamente 227 kg por ano, com uma parte significativa desses resíduos composta por entulhos de construção e demolição descartados em vias públicas e áreas urbanas.

O impacto negativo da construção civil inclui a exploração de minérios e minerais, dos quais uma parte substancial é direcionada à indústria, podendo contaminar o solo e as fontes de água. Além disso, os Resíduos da Construção Civil (RCC) podem constituir até 61% dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) em massa no Brasil, segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2012) [3]. Grande parte desses resíduos provém de obras de reforma, refletindo a falta de uma cultura de reutilização e reciclagem de materiais no setor. Embora a geração de resíduos seja inerente às atividades de demolição, os materiais resultantes poderiam ser reaproveitados, contribuindo para a redução do impacto ambiental da indústria da construção civil em Manaus. No entanto, devido à falta de alternativas viáveis, o descarte inadequado de RCD ainda é comum na cidade, tanto por pequenos empreiteiros quanto por empresas de médio e grande porte (Oliveira, 2021) [4].

A construção civil tem se consolidado não apenas pelo impacto econômico e social, mas também pelo aumento de resíduos sólidos descartados inadequadamente, sem tratamento, causando impactos econômicos e ambientais que podem resultar em escassez de recursos e água. É necessário um planejamento adequado para o gerenciamento dos resíduos sólidos da construção civil, incluindo sua caracterização, a busca por alternativas de recursos e a análise dos aspectos econômicos envolvidos. A adoção de práticas sustentáveis contribui para a preservação ambiental e a eficiência nos processos construtivos.

O impacto ambiental da construção civil é significativo devido à grande quantidade de resíduos gerados e ao crescimento acelerado das cidades. Segundo Amorim Júnior, os RCDs são gerados por atividades de diversos agentes da construção civil: empresas construtoras, incorporadoras, empresas de pequeno e médio porte prestadoras de serviços de engenharia, órgãos públicos e empreiteiras (Júnior, 2017).[5].

De acordo com a Resolução (CONAMA, 2002) [1], é atribuído aos geradores a responsabilidade pela gestão adequada dos resíduos das atividades construtivas, incluindo construção, reforma, reparos, demolições e remoção de vegetação e escavação do solo. Esta legislação impõe aos geradores a obrigação de adotar medidas que visem à minimização da geração de resíduos e à promoção de sua destinação adequada, alinhadas aos princípios de prevenção, precaução e responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos.

Este estudo visa auxiliar na gestão de resíduos sólidos produzidos na construção e na criação de alternativas para o reaproveitamento de RCD, economizando em materiais e minimizando desperdícios. Conforme a Resolução (CONAMA, 2002) [1], que estabelece diretrizes para a gestão integrada de resíduos da construção civil visando benefícios sociais, econômicos e ambientais, espera-se que os resultados deste estudo contribuam para o aprimoramento e o

conhecimento sobre os RCD em Manaus, propondo sugestões e recomendações para a gestão desses resíduos, tanto no âmbito público quanto privado.

A caracterização dos resíduos sólidos da construção civil é fundamental para seu correto gerenciamento e destinação final, consistindo na identificação dos tipos e quantidades de resíduos gerados, bem como suas particularidades físicas e químicas. Além das vantagens ambientais, o reaproveitamento e a reciclagem dos resíduos podem gerar retornos econômicos, reduzindo os custos com novos materiais e gerando receitas com a venda de resíduos reciclados.

2. Fundamentação Teórica.

Este estudo tem como propósito a identificação dos principais (quadro 1) impactos ambientais derivados dos resíduos de construção e demolição (RCDs) no município de Manaus - AM, estabelecendo uma análise comparativa com os critérios estipulados na Resolução (CONAMA,2002) [1]. Também objetiva-se listar os principais (quadro 2) impactos ambientais presentes nas áreas com deposições inadequadas de RCDs. Adicionalmente, será apresentada a destinação dos RCDs gerados no setor da construção civil em Manaus, bem como uma comparação com os requisitos definidos na resolução (CONAMA,2002) [1]

Quadro 1: Impactos Ambientais Associados aos Resíduos da Construção Civil (RCD).

Principais Impactos Ambientais Associados aos Resíduos da Construção Civil (RCD):			
Impacto Ambiental	Descrição	Consequências	Medidas Mitigadoras
Contaminação do Solo	Deposição inadequada de resíduos de construção pode liberar substâncias tóxicas.	Degradação da qualidade do solo, afetando a agricultura e a vegetação local.	Implementação de planos de gerenciamento de resíduos e controle rigoroso dos locais de descarte.
Contaminação da Água	Lixiviação de resíduos em áreas de descarte não regulamentadas.	Poluição de corpos d'água, afetando a fauna aquática e a qualidade da água potável.	Criação de barreiras de contenção e tratamento adequado dos resíduos antes do descarte.
Uso Ineficiente de Espaço em Aterros Sanitários	Deposição de resíduos de construção em aterros, ocupando espaço destinado a resíduos domésticos.	Redução da vida útil dos aterros sanitários e necessidade de novos locais de disposição.	Reciclagem e reutilização dos resíduos de construção para reduzir a quantidade enviada a aterros.
Obstrução de Sistemas de Drenagem	Resíduos descartados em locais inadequados podem bloquear sistemas de esgoto e drenagem.	Aumento do risco de inundações e danos às infraestruturas urbanas.	Monitoramento e manutenção regular dos sistemas de drenagem e criação de campanhas de conscientização sobre o descarte correto.

Fonte: Autores.

Quadro 2: Áreas Inadequadas de Descarte de Resíduos da Construção Civil (RCDs).

Detalhando as Áreas Inadequadas de Descarte de Resíduos da Construção Civil (RCDs) em Manaus:				
Área de Descarte Inadequada	Descrição	Impactos Ambientais	Consequências	Imagem
Vias Públicas	Resíduos descartados em ruas, calçadas e avenidas.	Obstrução de sistemas de drenagem e esgoto, poluição visual, e proliferação de vetores de doenças.	Inundações, danos às infraestruturas urbanas, aumento de custos com manutenção, e problemas de saúde pública.	
Áreas Verdes e Parques	Descarte de resíduos em parques, florestas urbanas e outras áreas verdes.	Contaminação do solo e água, destruição de habitats naturais, e impacto na biodiversidade.	Degradação de ecossistemas, perda de fauna e flora locais, e diminuição da qualidade ambiental e recreativa.	
Margens de Igarapés e Rios	Deposição de resíduos nas margens de cursos d'água.	Poluição da água, aumento da turbidez, e liberação de substâncias tóxicas.	Comprometimento da qualidade da água, afetando a vida aquática e a potabilidade da água, e aumento do risco de inundações.	
Terrenos Baldios	Descarte em terrenos desocupados e não regulamentados.	Contaminação do solo e águas subterrâneas, e proliferação de pragas e doenças.	Redução do valor das propriedades, riscos à saúde pública, e degradação ambiental local.	
Aterros Sanitários Não Regulamentados	Descarte em aterros não regulamentados ou ilegais.	Poluição do solo e água, emissão de gases de efeito estufa, e risco de desmoronamento e incêndios.	Perda de biodiversidade, impactos na saúde pública, e necessidade de remediação ambiental custosa.	
Áreas Próximas a Residências	Descarte de resíduos próximo a zonas residenciais.	Poluição visual, proliferação de vetores de doenças, e contaminação do solo.	Diminuição da qualidade de vida dos moradores, aumento de riscos à saúde, e desvalorização imobiliária.	

Fonte: Autores.

2.1 Classificação de resíduos de acordo com a resolução no 307 (2002) do CONAMA.

De acordo com (Júnior, 2017) [5], a referida Resolução define que os resíduos da construção civil são aqueles provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, assim como, daqueles resultantes do preparo e da escavação de terrenos. São exemplos de resíduos: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc. Pela (CONAMA,2002) [1], são classificados de acordo com as classes de A – D, descritas a seguir na figura 1:



Figura 2: Consolidação. Fonte: elaborado (Pinto,2023) [6]

O estudo conduzido por (Lima,2021) [7] explorou a gestão de resíduos em um canteiro de obras em Salvador, investigando o potencial para implementação de práticas alinhadas à economia circular. Utilizando uma abordagem que incluiu a elaboração de uma matriz de aspectos ambientais e oportunidades de negócio circular, juntamente com a aplicação de indicadores econômicos e ambientais, foi possível identificar a viabilidade econômica e ambiental da otimização do uso de recursos e da redução do desperdício.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabelecida pela (Lei nº 12.305/2010) [8], desempenha um papel crucial no contexto do gerenciamento de resíduos, incluindo aqueles originados na construção civil. Esta legislação é fundamentada na redução da geração de resíduos, na promoção da reciclagem e na destinação adequada dos materiais, visando à responsabilidade compartilhada e à sustentabilidade ambiental.

No estudo conduzido por (Munaro ,2022) [9], foram identificadas barreiras e oportunidades relacionadas à adoção de práticas de economia circular no setor da construção civil. Destacam-se a importância de instrumentos regulatórios, ações fiscais e políticas de governança integradas à agenda de desenvolvimento sustentável. A implementação eficaz da economia circular requer uma compreensão clara de seus impactos na sustentabilidade, nas cadeias de suprimentos e nos modelos de negócios.

A pesquisa realizada por (Silva,2017) [10] abordou a caracterização, alternativas de reuso e retorno econômico dos resíduos sólidos da construção civil. Destacou-se a relevância de estratégias sustentáveis para o gerenciamento desses resíduos, incluindo a reciclagem e a reutilização, como meio de minimizar o impacto ambiental e promover a eficiência no uso de recursos.

O estudo conduzido por (Santos, 2022) [11] sobre o gerenciamento de resíduos sólidos no Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente na Universidade Federal do Amazonas, em Humaitá, enfatizou a importância da caracterização dos resíduos para o desenvolvimento de estratégias eficazes de controle e manejo. Além disso, ressaltou-se a necessidade de engajamento de todos os envolvidos no processo, desde gestores até prestadores de serviços, visando a um gerenciamento adequado e sustentável dos resíduos sólidos.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2014) [12] define resíduos sólidos como aqueles no estado sólido ou semissólido, resultantes das atividades da comunidade em diversos setores, como industrial, doméstico, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição (ABNT, 2004) [12].

3. Procedimentos Metodológicos

O estudo foi conduzido utilizando uma abordagem qualitativa. Os objetivos específicos da pesquisa são: aprofundar o entendimento sobre resíduos de construção e demolição (RCD), investigar as destinações desses resíduos construtivos e identificar as principais causas para sua geração.

Para (Mota, 2014) [13] a destinação dos resíduos construtivos é feita da seguinte forma:

No estado do Amazonas, ainda não existe uma usina de recebimento dos resíduos da construção civil para o processo de reciclagem e tratamento adequado deles. O que vem acontecendo é o reaproveitamento de alguns materiais na própria construção ou redirecionados para outras, ou ainda a condução dos resíduos para as empresas que compram ou recebem para reaproveitamentos como: metais e ferros para beneficiador- metalúrgicas, madeiras para os fornos de olarias, e os demais que não são aproveitados conduzidos para o aterro sanitário municipal.

4. Resultados

Para dar continuidade à análise dos resultados obtidos sobre os impactos ambientais causados pelos resíduos sólidos de construção e demolição em Manaus – AM, é essencial realizar uma avaliação preliminar desses impactos. Esta pesquisa tem como objetivo compreender a extensão dos danos ambientais resultantes da geração e má gestão dos resíduos, e impactos, no quadro 03 demonstra o cenário atual em Manaus

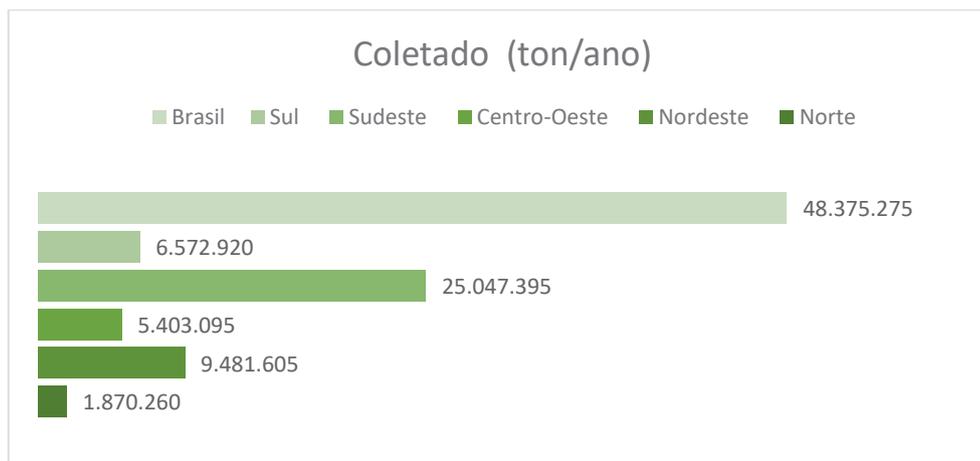
Quadro 3 :Análise bibliográfica com cenário atual.

Pontos Analisados	Bibliografia	Cenário Atual
Plano de Gestão de Resíduos e a Legislação Ambiental	<ol style="list-style-type: none"> 1. Em 09 de novembro de 2011, foi aprovado o Plano Diretor de Resíduos Sólidos de Manaus (PDRSM). Estruturado para o horizonte temporal de 20 anos, ou seja, de 2009 a 2029. 2. Em novembro de 2015, uma proposta do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Manaus (PMGIRS), foi submetida à Audiência Pública na Câmara Municipal de Manaus. 3. Em consonância com a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, foi instituída a Política Estadual de Resíduos Sólidos (PERS/AM) 	<ol style="list-style-type: none"> 1. O Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Manaus (PMGIRS), que contém o tópico sobre RCC, foi atualizado em 2015 pela SEMULSP e submetido à Consulta Pública, no entanto, não foi aprovado devido à recomendação do Ministério Público de Contas do Amazonas. 2. De acordo com o Secretário da SEMM - AS, esta atualização está em elaboração, sob a responsabilidade da Secretaria de Infraestrutura de Manaus (SEMINF) e SEMMAS;
Manejo dos Resíduos Sólidos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Em Manaus, a SEMULSP (Secretaria Municipal de Limpeza Urbana), é a Secretaria responsável pelos serviços de limpeza pública e manejo dos resíduos sólidos, e, portanto, tem a atribuição legal para seu ordenamento e administração; 2. De acordo com PDRSM, o acondicionamento dos resíduos da construção civil e demolição deverá ser realizado em sacos plásticos resistentes com capacidade mínima de 20 litros (capacidade nominal do saco de até 20kg); 3. Os grandes geradores devem acondicionar seus resíduos conforme estabelecido no Plano Municipal de Gestão Integrada dos Resíduos da Construção Civil elaborado pelo Município; 	<ol style="list-style-type: none"> 1. De acordo com as informações prestadas pelo Diretor do aterro sanitário, em visita realizada ao complexo, atualmente são trinta e três empresas terceirizadas, que possuem autorização para fazer o seu descarte de RCC no local; 2. De acordo com os dados fornecidos pela Secretaria, no ano de 2022, foram destinados ao aterro, 10.228 toneladas. Porém, isso se refere apenas a uma estimativa. 3. Não há controle sobre quantidade de RCC gerada ou descartada, devido aos descartes ilegais e ausência de sistema de rastreamento.
Da Coleta ao Descarte de RCC	<ol style="list-style-type: none"> 1. Segundo Cruz (2018), os resíduos da construção civil são armazenados e coletados pelas empresas de entulho; 2. No ano de 2017, de acordo com dados fornecidos pela SEM ULSP, a quantidade de RCC descartado no aterro sanitário de Manaus, foi de 2.070,10 toneladas, no período de janeiro a outubro; 3. Os RCC, são provenientes de empresas prestadoras de serviços, tais como disque entulhos, construtoras, indústrias, dentre outras, as quais solicitam autorização para descarte de resíduos no aterro sanitário de Manaus 	<ol style="list-style-type: none"> 1. O Instituto de Proteção Ambiental do Estado do Amazonas (IPAAM) é o órgão responsável pela expedição das licenças ambientais para as empresas que realizam as atividades de coleta, transporte e destinação dos RCC, assim como para as áreas destinadas ao descarte dos entulhos de obra, bem como o monitoramento e a fiscalização da destinação final e/ou para processamento de resíduos; 2. O monitoramento é realizado através do acompanhamento do cumprimento integral das restrições e condições constantes no verso das licenças ambientais;
Destinação Irregular de RCC	<ol style="list-style-type: none"> 1. Em 2018, foram identificados 49 pontos de descarte irregulares, distribuídos no bairro Distrito Industrial II, onde 31 dos pontos encontram-se nos limites do bairro e os outros 18 pontos estão distribuídos em vias internas do bairro, onde se localizam terrenos baldios, curso d'água e ramais; 2. As áreas verdes, são os locais preferidos pelos infratores. Isso é apenas uma amostra, como diversos locais estão servindo de depósito de entulhos dentro do perímetro urbano do município de Manaus. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. A fiscalização de bota-fora ilegais, ocorre somente mediante denúncias, segundo informações da Gerência Técnica do Órgão, ou seja, não há fiscalizações rotineiras, devido ao número de técnicos que é desproporcional para o atendimento da cidade de Manaus

Fonte: Adaptado pelos autores (Pinto ,2023).[6]

A quantidade significativa de resíduos sólidos provenientes da construção e demolição em Manaus representa um desafio ambiental e logístico, sobrecarregando os sistemas de coleta, transporte e destinação final. Além disso, a falta de infraestrutura adequada para a destinação final dos RCDs pode resultar em sua disposição ilegal em áreas impróprias, como terrenos baldios e margens de rios, causando danos ao meio ambiente e à saúde pública, na figura 02 está dado de (ABRELPE, 2021) [2]

Figura 2: Total de RCD coletados no Brasil e regiões (tx1000/ano)



Fonte: Adaptado pelos autores (ABRELPE, 2021) [2]

Segundo (Silvia 2017) [10], dentre os resíduos gerados na construção estão os resíduos perigosos, que são embalagens plásticas e metálicas contendo resíduos perigosos, instrumentos de aplicação e materiais para a limpeza utilizados nos canteiros de obras, como: broxas, pincéis, trinchas, panos, trapos, estopas e outros materiais auxiliares.

Dentre os resíduos gerados na construção estão os resíduos perigosos, que são embalagens plásticas e metálicas contendo resíduos perigosos, instrumentos de aplicação e materiais para a limpeza utilizados nos canteiros de obras, como: broxas, pincéis, trinchas, panos, trapos, estopas e outros materiais auxiliares. O quadro 04 apresenta a geração de resíduos por fonte geradora: (Ádria 2017) [14]

Quadro 4 – fontes geradoras de resíduos:

<i>Natureza da geração</i>	<i>Tipos de resíduos gerados</i>
Escavações	Solo
Demolição	Concreto, argamassas, tijolos, componentes cerâmicos e gesso.
Perdas por extravio	Tijolos e componentes cerâmicos
Perdas por Desperdício	Concreto, argamassas e gesso.
Perdas por processamento em si	Tijolos, componentes cerâmicos, plástico, metais e madeira
Pintura (Resíduos perigosos)	Tintas, seladores, vernizes, texturas, pincéis, broxas, trinchas, trapos, estopas e embalagens plásticas e de metal.

Fonte: (Ádria 2017) [14]

5. Considerações Finais

Considerando a pesquisa realizada sobre análise dos impactos ambientais causados pelos resíduos sólidos da construção e demolição em Manaus – Am. Revelou uma série de preocupações ambientais significativa que exigem atenção imediata e ação coordenada. Embora a reciclagem de resíduos de construção se apresente como a solução mais vantajosa para minimizar o impacto ambiental e a deposição clandestina de entulhos, sua efetiva implementação requer um processo gradual e a construção de instituições públicas municipais adequadas. Os crescentes índices populacionais e a contínua construção de moradias em Manaus têm exacerbado a problemática dos resíduos da construção civil, resultando em significativos impactos ambientais e na qualidade de vida da população local.

A reciclagem emerge como um método eficaz para enfrentar esses desafios, particularmente devido ao alto potencial de aproveitamento dos resíduos na construção civil, que consome uma parcela significativa dos recursos naturais. A triagem e transferência dos resíduos revelam a viabilidade de reciclar e reutilizar esses materiais em aplicações como pavimentação asfáltica e construção de habitações populares, muitas vezes a um custo inferior ao da limpeza de áreas de deposição clandestina e demolição.

Além disso, é de suma importância ressaltar o papel da educação ambiental na diminuição da geração de resíduos provenientes da construção e demolição. Estratégias informativas bem elaboradas e integradas às políticas municipais têm o potencial de induzir mudanças comportamentais e culturais em relação aos resíduos, promovendo a conscientização sobre seus impactos ambientais e sociais. A implementação de práticas direcionadas à redução de resíduos, com enfoque na sustentabilidade, representa um passo significativo em direção a uma gestão mais eficaz desses materiais.

Em conclusão, é evidente a necessidade de aprimorar a legislação municipal relacionada ao manejo de resíduos sólidos de construção em Manaus. Recomenda-se, portanto, a realização de novos estudos para uma análise mais aprofundada das leis existentes, visando promover uma gestão mais eficaz e sustentável desses resíduos.

Referências

- [1] CONAMA. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA. Resolução CONAMA N° 307 de 5 de julho de 2002. In: Resoluções, 2002. Disponível em <http://www.mma.gov.br> > acesso em 05 de abril de 2024
- [2] ABRELPE - Associação Brasileira de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2022. Abrelpe, 2022. Disponível em: Acesso em 17 março de 2024.
- [3] IPEA-Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Construção Civil. Relatório de Pesquisa. Brasília, 2012. Disponível em: Acesso em 17 março de 2024.
- [4] OLIVEIRA, Maria do Perpétuo Socorro Lamego. Desenvolvimento de estratégias para a gestão dos resíduos de construção e demolição no município de Manaus (Amazonas-Brasil) com base no conceito de economia circular. 2021

- [5] AMORIM JÚNIOR, Laelson de Andrade. Classificação e quantificação dos resíduos de construção e demolição (RCD) e suas potencialidades de reciclagem ou reutilização em cinco obras de edificação na cidade do Recife. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Brasil.
- [6] PINTO, Cynthia; SILVA, Simone. Análise do gerenciamento de resíduos da construção civil na cidade de Manaus, sob a perspectiva da sustentabilidade. *Peer Review*, v. 5, n. 12, p. 223-243, 2023
- [7] LIMA, Bruno Fernandes; ALBERTE, Elaine Pinto Varela; CARNEIRO, Alex Pires. Economia circular na construção: uma análise sobre a gestão de RCD em um canteiro de obras. *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GESTÃO E ECONOMIA DA CONSTRUÇÃO*, v. 12, 202
- [8] Lei N° 12.305, de 2 de agosto de 2010. Disponível em: http://legislacao.planalto.gov.br/legisla/legislacao.nsf/Viw_Identificacao/lei%2012.305-2010?OpenDocument Acesso em: 15 de abril de 2024
- [9] MUNARO, Mayara Regina; TAVARES, Sergio Fernando. A economia circular na construção civil: principais barreiras e oportunidades para a transição do setor. *Revista Tecnologia e Sociedade*, v. 18, n. 53, p. 54-71, 2022.
- [10] DA SILVA, Welighda Christia; SANTOS, Gilmar Oliveira; DE ARAÚJO, Weliton Eduardo Lima. Resíduos Sólidos de Construção Civil: caracterização, alternativas de reuso e retorno econômico. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, v. 6, n. 2, p. 286-301, 2017.
- [11] SANTOS, Miquele Araújo dos et al. Gerenciamento dos resíduos sólidos gerados no Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente na Universidade Federal do Amazonas, em Humaitá. 2022.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2004. Resíduos sólidos – Classificação: NBR-10004. Rio de Janeiro: ABNT 63p.
- [13] MOTA, Jeane, A DESTINAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM MANAUS: DO CANTEIRO DE OBRAS AO DESTINO FINAL - Setembro/2014.
- [14] DA SILVA, Ádria Souza et al. Gestão de resíduos sólidos na construção civil: Estudo de caso em duas empresas na Cidade de Manaus-AM. *InterfaceEHS*, v. 12, n. 1, 2017.

Utilização do Mapeamento Sistemático para a realização de uma revisão de literatura sobre métodos e tratamentos de água contaminada por rejeito de minério de ferro e petróleo utilizando floculação por taninos vegetais.

Use of Systematic Mapping to carry out a literature review on methods and treatments of water contaminated by iron ore and petroleum waste using vegetable tannin flocculation.

RAGGI, Fernanda Grossi, doutoranda em Modelagem e Tecnologia para Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Instituto Federal Fluminense

fernanda.grossi@gsuite.iff.edu.br

ARAÚJO, Thiago Moreira de Rezende, doutor em Ciências Naturais, Instituto Federal Fluminense

Thiago_uenf@yahoo.com.br

DUARTE, Neimar de Freitas, doutor em Biologia Vegetal, Instituto Federal de Minas Gerais

neimar@ifmg.edu.br

RESUMO

As inúmeras variantes de remoção de rejeitos provenientes de atividades minerárias e petrolíferas que contaminam cursos d'água são apresentadas na literatura utilizando floculantes naturais e artificiais, que incluem remoção de metais pesados dissolvidos e quelatos de óleos e graxas. A importância deste artigo foi pautada na busca de trabalhos já publicados utilizando taninos vegetais em processos de floculação de resíduos oleosos e contendo minério de ferro, e na realização de um mapeamento sistemático para responder às questões de pesquisa direcionadas ao estado da arte do tema proposto. Trata-se de uma forma de pesquisa secundária que categoriza uma grande quantidade de estudos existentes na literatura com base em seus resultados, contabilizando as contribuições. Foram definidas questões de pesquisa que nortearam o mapeamento (Quais taninos vegetais são mais utilizados em estudos de remoção de metais e compostos oleosos por floculação presentes em água provenientes de rejeitos? Quais métodos são mais utilizados em estudos de remoção de metais e compostos oleosos por floculação presentes em água provenientes de rejeitos?); os critérios de seleção, inclusão e exclusão dos trabalhos investigados; as palavras chaves (ou thesaurus) definidas a partir do método PICOC; e as bases utilizadas para as buscas - Scopus e Web of Science, por meio da interconexão da plataforma Parsifal. Como resultado final, foram obtidos dez artigos com estudos realizados entre os anos de 2015 e 2021, sendo a maior concentração de publicações em 2021, o que ressalta a importância do tema e, ao mesmo tempo, a necessidade de realização de estudos de forma a atualizar o banco de dados.

Palavras-chave: biorremediação; taninos vegetais; tecnologias de despoluição; rejeito de minério de ferro; hidrocarbonetos de petróleo.

ABSTRACT

The numerous variants of removing waste from mining and oil activities that contaminate waterways are presented in the literature using natural and artificial flocculants, which include removal of dissolved heavy metals and chelates from oils and greases. The importance of this article was based on the search for already published works using vegetable tannins in oily waste flocculation processes and those containing iron ore, and on carrying out a systematic mapping to answer research questions directed to the state of the art of the proposed topic. This is a form of secondary research that categorizes a large number of existing studies in the literature based on their results, accounting for contributions. Research questions were defined that guided the mapping (Which vegetable tannins are most used in studies on the removal of metals and oily compounds by flocculation present in water from waste? Which methods are most used in studies on the removal of metals and oily compounds by flocculation present in water from waste?); the selection, inclusion and exclusion criteria for the works investigated; the key words (or thesaurus) defined using the PICOC method; and the bases used for searches - Scopus and Web of Science, through the interconnection of the Parsifal platform. As a result, ten articles were obtained with studies carried out between 2015 and 2021, with the largest concentration of publications in 2021, which highlights the importance of the topic and, at the same time, the need to carry out studies in order to update database.

Key-words: *biorremediation; vegetaltannin; depolution technology; iron ore tailings; petroleum hydrocarbon.*

1 Introdução

As atividades que estão relacionadas à mineração e exploração petrolífera representam importância econômica de grande relevância para o país, de tal forma que apresentaram crescimento exponencial nas últimas décadas (IBRAM, 2022 [1]; ANP, 2022 [2]). Em especial, a contaminação de cursos d'água desperta maior atenção quando se trata dos impactos ambientais relacionados a estas atividades, uma vez que tanto a polpa de rejeitos de minério (MUNIZ & OLIVEIRA-FILHO, 2006) [3] quanto compostos oleosos formados por hidrocarbonetos (SILVA *et al.* 2008) [4], podem prejudicar o equilíbrio dos ciclos biogeoquímicos e ecológicos locais e globais.

Há um consenso intuitivo sobre os impactos ambientais gerados pela indústria do petróleo, onde a percepção se concentra geralmente nos vazamentos ocorridos em plataformas, navios e terminais (LIMMER, 2018) [5]. Em relação ao minério, Andrade *et al.* (2004) [6] discorre que diversas substâncias químicas são utilizadas no beneficiamento do minério como depressores, flocculantes, dispersantes, coletores, espumantes, auxiliares de filtração, entre outros, resultando no concentrado de rejeito, que não possui utilização econômica após a exploração, e que é disposto em barragens (rejeitos finos) ou em diques de alteamento (rejeitos granulares) (IBRAM, 2022) [1].

Sabendo dos impactos gerados pelos empreendimentos minerários e petrolíferos, Santos (2014) [7] ressaltou a importância de estudos sobre o tratamento de efluentes advindos destes setores, com a finalidade de reduzir a concentração de contaminantes e do volume acumulado. Diversas tecnologias de tratamento, tradicionais e avançadas, são aplicadas em efluentes de águas oleosas e de rejeitos minerários, para remoção de partículas coloidais, como coagulação, floculação e métodos biológicos e eletrolíticos (LEE; ROBINSON; CHONG, 2014) [8]. Desta forma, o desenvolvimento de tecnologias para a separação destes da água se faz relevante, assim como a utilização de compostos orgânicos em substituição aos compostos inorgânicos tradicionais (LEE; ROBINSON; CHONG, 2014) [8].

As inúmeras variantes de remoção de rejeitos da água, principalmente provenientes de atividades petrolíferas e de mineração, são apresentadas na literatura utilizando, por exemplo, floculantes naturais e artificiais (SANTOS, 2009) [9]. Rubio, Oliveira & Silva (2010) [10] explicam que as pesquisas acerca do tratamento de efluentes líquidos são direcionadas para muitas áreas, incluindo remoção de metais pesados, de sólidos suspensos, de complexos e quelatos, de óleos e graxas, águas de minas contaminadas com baixas concentrações de metais pesados dissolvidos; separação de óleos emulsificados ou não, coloides e ultrafinos depositados em bacias de contenção ou na forma de suspensão.

O sistema de tratamento físico-químico de coagulação, floculação e sedimentação utilizado para efluentes com coagulantes naturais vem sendo estudado no tratamento de diferentes tipos de efluentes. O grande apelo para a utilização de taninos está no fato de que sua capacidade de se combinar com proteínas e metais é preservada após as reações químicas, além de ser um produto obtido de fontes renováveis e de composição orgânica, podendo ser biologicamente degradado ou eliminado termicamente (SILVA *et al*, 2004) [11].

Dessa forma, a importância deste artigo foi pautada na busca de trabalhos já publicados utilizando taninos vegetais em processos de floculação de resíduos oleosos e minerários.

2 Objetivos

O objetivo deste trabalho foi realizar um mapeamento sistemático, de forma a obter uma revisão por meio da busca de ensaios já realizados com taninos e metodologias de descontaminação e floculação, para responder às questões de pesquisa direcionadas ao estado da arte do tema proposto.

3 Justificativa

Os taninos vegetais são compostos orgânicos polifenólicos com hidroxilas livres, solúveis em água, de baixo peso molecular, possuindo a habilidade de combinar-se com macromoléculas e formar complexos insolúveis com celulose, proteínas, pectinas e alcaloides (MELLO e SANTOS, 2010) [12]. As plantas que os possuem em sua constituição são denominadas taníferas ou tanantes, e em alguns casos o teor é alto o suficiente para permitir aplicação industrial (RIZZINI & MORS, 1976) [13].

Segundo a estrutura química, podem ser classificados em taninos hidrolisáveis e condensados. Os hidrolisáveis são comumente encontrados nas folhas, sementes, brotos, frutos, madeiras, e cujas ligações ésteres são passíveis de sofrer hidrólise por ácidos ou enzimas. Em solução, desenvolvem coloração azul no contato com cloreto férrico. Os taninos condensados - encontrados na matéria seca de cascas de angiospermas e gimnospermas lenhosas -, são proantocianidinas, responsáveis pela adstringência e, sob tratamento com ácidos ou enzimas, se polimerizam em substâncias vermelhas insolúveis. No caso de compostos oleosos, apresentam cor variando entre azul e vermelho, de acordo com o pH (MELLO & SANTOS, 2010) [12].

Aplicados como polímeros aniônicos biodegradáveis, têm se mostrado coagulantes naturais efetivos numa ampla faixa de pH, atuando nas etapas de coagulação e floculação, e como depressor na flotação de minério de ferro (SILVA, 2016) [14] e de petróleo (PAULO *et.al*, 2013) [15]. Dessa forma, podem substituir componentes químicos inorgânicos e serem degradados biologicamente, reduzindo os impactos por contaminação de poluentes.

Estudos realizados com espécies vegetais ricas em taninos revelam alto poder de coagulação em tratamentos primários de efluentes. A extração aquosa e purificação prévia das proteínas ativas já demonstrou ser responsável por sua ação coagulante, através de mecanismo de adsorção, e consequente neutralização das cargas coloidais, seguido de sedimentação. Assim, contribuem para a redução do volume contido em barragem, por ser facilitador da decantação do material sólido. Ainda, alguns ensaios já comprovaram que o ácido tânico (tanino) mostrou ser mais seletivo para metais e compostos oleosos em floculação como depressor, apresentando concentrados mais puros em sua recuperação (SOUSA, 2015) [16].

4 Metodologia

O Mapeamento Sistemático (MS) é definido por Cooper (2016) [17] como uma forma de pesquisa de estudos secundários. Enquanto estudos primários são investigações originais (e.g., estudos de caso), os estudos secundários são aqueles que estabelecem conclusões a partir dos resultados dos estudos primários (e.g., metanálises) (CAMPANA, 1999) [18]. Os mapeamentos sistemáticos são um método que consiste em categorizar uma grande quantidade de estudos existentes na literatura com base em seus resultados, contabilizando as contribuições a partir desta categorização (PETERSEN *et al.*, 2015) [19]. Este método destina-se a identificar lacunas e oportunidades de pesquisa, apresentando objetivos genéricos e abrangentes, cujo foco é expandir os conhecimentos do pesquisador sobre um determinado tema (BUDGEN *et al.*, 2008) [20].

As Revisões Sistemáticas (RS) são ao um meio de avaliar e interpretar toda a pesquisa relevante sobre uma pergunta, tópico ou interesse específico (KITCHENHAM and CHARTERS, 2007) [21]. Desta forma, as revisões analisam um conjunto menor de estudos, pois têm objetivos específicos e focam em aprofundar os conhecimentos já existentes em um determinado tema, como a comparação entre a eficácia de diferentes métodos. Ambos estudos sistemáticos são rigorosamente conduzidos para que possam ser reprodutíveis, geralmente possuindo uma forma muito similar entre si (BUDGEN *et al.*, 2008) [20], com leves adaptações conforme suas variações. Uma breve diferenciação entre os dois métodos é explicitada no Quadro 01.

A partir de evidências, é possível criar argumentos e conexões para a geração de novas hipóteses ou confirmação de outrem. Desta forma, o mapeamento constitui-se em uma metodologia que frequentemente é empregada nas investigações, resultando em estudos que fornecem uma estrutura de classificação de resultados sobre o que foi publicado. Tal classificação permite ligações visuais, ou seja, o mapa dos resultados (PETERSEN *et al.*, 2015) [19], constituindo um conjunto concreto de dados e conhecimentos sobre um determinado assunto.

Quadro 01 - Principais variações entre mapeamentos e revisões sistemáticos.

Característica	Mapeamento	Revisão
Objetivo Principal	Abrangência	Profundidade
Questões de Pesquisa	Genéricas	Específicas
Escopo	Ampla quantidade de estudos	Pequena quantidade de estudos
Estilo de Revisão	Categorização	Análise

Fonte: adaptado de Klock (2020).

Ainda, é um meio de avaliar de maneira confiável os trabalhos relevantes existentes em torno de uma determinada questão de pesquisa (KITCHENHAM and CHARTERS, 2007)

[21]. O método objetiva encontrar respostas, evidências e lacunas analisando, identificando, avaliando e interpretando os estudos relevantes em um dado tema ou fenômeno de interesse. A análise da literatura científica identifica a quantidade e qualidade das evidências, além de mostrar a abrangência do tema e onde são publicados, permitindo assim uma visão geral sobre o assunto pesquisado (PETERSEN *et al.*, 2015)[19].

Como resultado, o mapeamento sistemático gera uma Revisão Sistemática de literatura, que é definida por um método de busca secundário que tem por objetivo reunir estudos semelhantes ao tema proposto ao trabalho realizado, avaliando-os criticamente em sua metodologia e reunindo-os numa análise estatística, a metanálise, quando possível. Agregar evidências de pesquisa para guiar a prática proposta é uma das principais razões para se desenvolverem estudos que sintetizam a literatura, mas não é a única. As revisões sistemáticas são desenhadas para serem metódicas, explícitas e passíveis de reprodução. Esse tipo de estudo serve para nortear o desenvolvimento de projetos, indicando novos rumos para futuras investigações e identificando quais métodos de pesquisa foram utilizados em uma área. Boas revisões sistemáticas, como resultados de bons mapeamentos, são recursos importantes ante o crescimento acelerado da informação científica. Esses estudos ajudam a sintetizar a evidência disponível na literatura sobre uma intervenção (KITCHENHAM and CHARTERS, 2007) [21].

Um mapeamento sistemático se inicia com uma pergunta clara, passando pela definição de uma estratégia de busca, pelo estabelecimento de critérios de inclusão e exclusão dos artigos, além de uma análise criteriosa da qualidade da literatura selecionada. De acordo com KITCHENHAM *et al.* (2009) [22] *apud* Luz e Zuffo (2019) [23], as etapas básicas de elaboração de um mapeamento sistemático de literatura são detalhadas no fluxograma da Figura 01 a seguir.

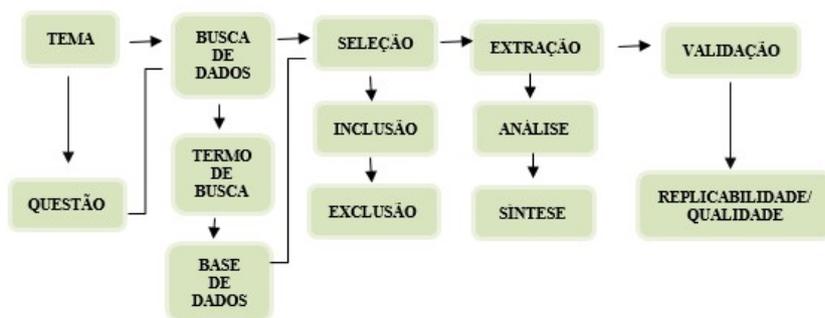


Figura 01 – Fluxograma com as etapas de aplicação do Mapeamento Sistemático da Literatura. Fonte: adaptado de Luz e Zuffo (2019).

De acordo com Eco e Sebeok (2008) [24], o mapeamento sistemático inicia-se pela criação de um protocolo, tendo como base a ideia de criação de “regras” da abdução em três etapas, constituídas com respostas às seguintes questões:

- a) Qual é o objetivo e a questão que norteia o mapeamento?
- b) Quais os critérios de seleção, inclusão e exclusão dos trabalhos investigados?
- c) Quais palavras chaves serão utilizadas?

4.1 Questões de pesquisa

As questões de pesquisa levantadas para execução do mapeamento têm como objetivo indicar tendências e atualizações do tema abordado (PETERSEN *et al.*, 2015) [19]. Sendo

o objetivo deste mapeamento sistemático de literatura o estado da arte sobre a temática de tratamento de água contaminada por rejeitos de minério de ferro e compostos oleosos provenientes de hidrocarbonetos, foram estabelecidas as seguintes questões (Qs):

Q1: quais taninos são mais utilizados em estudos de remoção de metais e compostos oleosos por floculação presentes em água provenientes de rejeitos?

Q2: quais métodos são mais utilizados em estudos de remoção de metais e compostos oleosos por floculação presentes em água provenientes de rejeitos?

4.2 Termos de busca

A definição das palavras-chave mais adequadas auxilia na formação dos argumentos de busca e filtros em plataformas específicas. Mais conhecidos como thesaurus, estas palavras chave formam uma lista de termos com significados semelhantes, dentro de um domínio específico de conhecimento em relação à questão de pesquisa. Por definição, um thesaurus é restrito e não deve ser considerado simplesmente como uma lista de sinônimos, pois os objetivos dos thesaurus são justamente mostrar as diferenças mínimas entre as palavras, ajudar o autor a escolher a palavra exata, eliminar as ambiguidades dos termos e facilitar o acesso tanto do profissional da informação quanto do usuário, evitando uma desorganização e uma possível insatisfação de quem necessita se informar. Segundo Moreiro & José (2011) [25] essa linguagem documentária também tem como objetivo ajudar o usuário na indexação e na consulta dos registros, fornecendo a ele o termo que procura e os termos relacionados, devido ao controle do vocabulário com a representação do conteúdo dos documentos de forma singular.

Desta forma, na construção de um thesaurus conceitual são necessários princípios para estabelecimento do termo e das relações entre eles. Projetando estes princípios, foram definidas palavras – chave que foram agrupadas pelo método **PICOC** (KITCHENHAM & CHARTERS, 2007) [21], onde o pesquisador deve definir a população (P), a intervenção (I), a comparação (C) os outcomes (resultados) (O), e o contexto (C). Para o presente trabalho, foram utilizados os seguintes thesauri ou palavras chave, de acordo com o PICOC:

População: tanino vegetal, minério de ferro, petróleo;

Intervenção: separação por floculação;

Comparação: tanino condensado; tanino hidrolisável;

Outcome (resultados): floculação de minério por tanino vegetal; floculação de petróleo por tanino vegetal;

Contexto: estudos de tratamento de água utilizando tanino vegetal como floculante de minério de ferro e petróleo.

Quando pertencentes a um mesmo grupo, as palavras são agrupadas por um operador lógico OU (OR) e, quando em grupos distintos, agrupadas com um operador lógico E (AND). Desta forma, foram utilizadas as strings de pesquisa (“TANINO VEGETAL”); (“TANINO VEGETAL”) E (“FLOCULAÇÃO”); (“TANINO VEGETAL”) E (“FLOCULAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO”); (“TANINO VEGETAL”) E (“FLOCULAÇÃO DE PETRÓLEO”).

4.3 Bases de dados e plataformas de busca

Após a definição das *strings* de busca estas foram rodadas, por meio da plataforma *online* PARSIFAL, nas bases de dados das bibliotecas virtuais *Web of Science* e *Scopus*. Estas bases foram selecionadas por serem muito utilizadas no meio científico acadêmico e

apresentarem, em uma busca inicial informal, maior número de periódicos indexados relacionados aos thesauri e ao tema proposto. Em ambas as bases foi possível baixar os títulos e resumos dos resultados da busca em arquivo BibTex, necessário para importação na plataforma Parsival. Ainda, foi possível definir e eliminar, dentro da plataforma Parsival, os artigos em duplicata, ou seja, identificados em ambas as bases de dados, evitando assim seu duplo registro.

5 Resultados e Discussão

A String da busca utilizada em cada base é apresentada na Tabela 1 a seguir, bem como a quantidade de resultados. A busca foi realizada por título, resumo e palavras-chaves (title-abstract-keywords) na Web of Science e Scopus, não havendo restrição para o ano das publicações nas duas Bases de Dados. Como critérios de inclusão foram considerados trabalhos relacionados e taninos vegetais e floculação de minério de ferro; e taninos vegetais e floculação de petróleo. Como critérios de exclusão foram considerados trabalhos relacionados à utilização de polímeros floculantes; e utilização de taninos em ensaios experimentais fora de tratamento de água ou com linhas de pesquisa não aderentes.

Para auxiliar nesta seleção, foi utilizado o método PRISMA (Principais Ítens para Relatar Revisões sistemáticas e Meta-análises), que objetiva melhorar o relato de revisões sistemáticas e meta-análises, além de contribuir para uma avaliação crítica de revisões sistemáticas publicadas (PRISMA, 2024) [26] (Fuxogramas das Figuras 02 e 03).

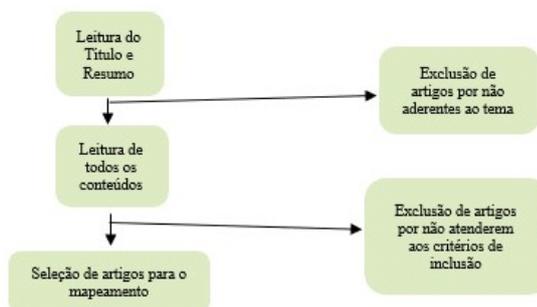


Figura 02 - Fluxograma com etapas iniciais do método PRISMA utilizadas. Fonte: elaborado pela autora.

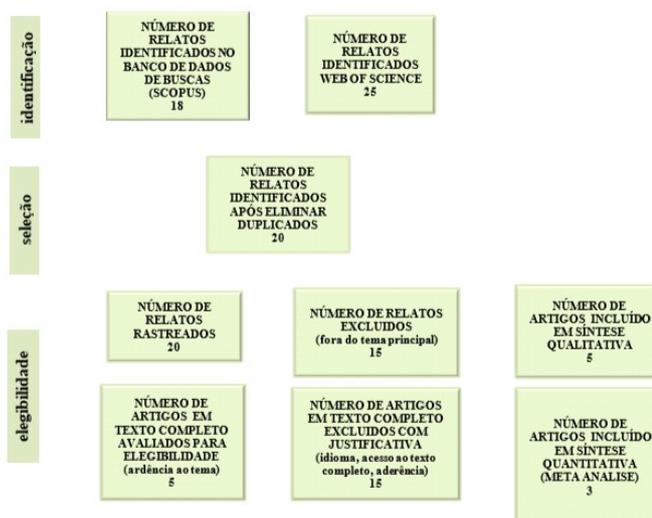


Figura 03 – fluxograma com as especificidades das etapas do PRISMA utilizadas no trabalho. Fonte: elaborado pela autora.

Os resultados, demonstrados na Tabela 01 a seguir, foram filtrados e selecionados a partir do título e do resumo, chegando a um total de 127 artigos para utilização de taninos vegetais em floculação de minério de ferro e 58 para utilização de taninos vegetais em floculação de petróleo. Entretanto, foram selecionados 14 elegíveis para o primeiro *spring* e 11 para o segundo, de acordo com os critérios de inclusão já descritos. Ainda, foram considerados para exclusão, além dos critérios estabelecidos, 10 duplicados para o primeiro *spring* e 6 para o segundo.

Tabela 01 – resultados obtidos a partir do método PRISMA.

Base: Scopus x Web of Science	Thesaurus	Resultados	Elegíveis Scopus
Última data de busca: 02/02/22	"tanino vegetal"	501.000	50
	"tanino vegetal" E "floculação"	326.000	10
	"tanino vegetal" E "floculação de minério de ferro"	127	14
	"tanino vegetal" E "floculação de petróleo"	58	11

Fonte: elaborado pela autora.

A Tabela 02 a seguir apresenta a localização dos artigos completos selecionados pelo critério de elegibilidade.

Tabela 02 – localização dos artigos completo selecionados pelo critério de elegibilidade. Fonte: elaborado pela autora, adaptado de Parsifal, 2022.

	TÍTULO	AUTOR	MÊS/ANO	Periódico	QUARTIL
1	Uma revisão dos metabólitos vegetais com capacidade de interação com metais: uma abordagem verde para aplicações industriais	Nobahar A.	Ago/2021	BioMetals	Q1
2	Coagulantes naturais para o tratamento de água e esgoto: uma opção futurística para clarificação sustentável da água	Karnena M.K.	Abr/2021	Recent Innovations in Chemical Engineering	Q2
3	Uso de coagulantes naturais para tratamento de águas residuais industriais	Gautam S.	Out/2020	Global Journal of Environmental Science and Management	Q2
4	Produtos naturais usados como coagulantes e floculantes para abastecimento público de água: uma revisão dos benefícios e potencialidades	Lima RN	Jun/2018	Revista Virtual de Quimica	Q3
5	Avanço em coagulantes poliméricos naturais em operações de tratamento de água e esgoto	Oladoja N.A.	Jun/2015	Journal of Water Process Engineering	Q2

Fonte: elaborado pela autora.

A partir dos dados compilados na Tabela 02, foi possível gerar o Gráfico 01 da Figura 03 a seguir, contendo o número de estudos obtidos por ano de publicação.



Figura 04 – gráfico contendo o número de estudos selecionados por ano. Fonte: elaborado pela autora.

A partir dos 10 artigos selecionados, foi gerada a Tabela 03, de intervenção, com o número de artigos por Método/técnica/procedimento utilizados.

Tabela 03 Intervenções dos artigos completos selecionados.

Autores (Ano)	Descrição	Tipo de tanino/método utilizado
Nobahar A. Ago/2021	Identificação de taninos com boa capacidade quelante com metais, com potencial de utilização como descontaminante em atividades industriais	Tanino hidrolisável; floculação com metais;
Karnena M.K. Abr/2021	A presente revisão se concentra principalmente nas questões relacionadas aos coagulantes naturais para esclarecer as incertezas e, simultaneamente, mover as indústrias a utilizarem, quando houver dificuldades ou maior intensidade poluente, de mesclas entre coagulantes artificiais e naturais.	Tanino hidrolisável; floculação com metais;
Gautam S. Out/2021	Aplicação dos coagulantes naturais no tratamento de efluentes industriais, vantagens e desvantagens relativas em relação aos coagulantes químicos; potenciais aplicações comerciais em larga escala de coagulantes naturais no lugar dos sintéticos.	Tanino hidrolisável; floculação com metais;
Lima, RN Jun/2021	Compilação de diversos estudos desenvolvidos nos últimos anos que relatam a obtenção e eficiência de materiais naturais, limitações e malefícios dos coagulantes tradicionais à base de sais inorgânicos e polímeros sintéticos, mecanismos de ação, em contraste com os principais parâmetros físico-químicos utilizados no controle de qualidade de águas naturais e tratadas.	Tanino hidrolisável; floculação com metais;
Pontes, T., R. Set/2020	Neste projeto foram desenvolvidos aditivos emulsificantes a partir da hidrofobização parcial dos taninos. Os resultados mostraram que os produtos sintetizados atuaram tanto como agentes emulsificantes como modificadores reológicos para emulsões de óleo em água, entretanto, os naturais também apresentam bons resultados.	Tanino condensado, petróleo;
Souza <i>et.al.</i> Fev, 2020	O tanino extraído de espécies vegetais presentes em fazendas produtoras de couro, na clarificação de águas residuárias, também pode ser utilizada no tratamento de óleos a base de hidrocarbonetos.	Tanino condensado; floculação com petróleo;
Pontes, 2020.	Os taninos vegetais são importantes na produção de resinas e dispersantes para controlar a viscosidade dos poços na indústria petrolífera. Essas resinas apresentam características de ligação interna,	Tanino condensado; floculação com petróleo;

	tempo de formação de géis e viscosidade semelhantes às das resinas de uso comercial, sendo o mais eficiente o condensado.	
Azevedo <i>et.al.</i> , 2018.	A jurema-preta (<i>Mimosa tenuiflora</i>), espécie típica do semiárido brasileiro, possui potencial para a produção de taninos vegetais. Observou-se que a fenologia das plantas influenciou no teor de taninos condensados, pois quando as árvores tinham frutos e flores apresentaram menor teor de taninos. Já na presença de folhas verdes foi observado maior teor de taninos condensados nas plantas.	Tanino condensado; floculação com petróleo;
Oladoja N.A. Jun/2015	Apesar da ampla aplicabilidade de coagulantes para tratamento de efluentes, os desafios associados ao uso têm gerado esforços de pesquisa para o desenvolvimento de coagulantes de base biológica verde, cujas aplicações são capazes de contornar os desafios sinônimos do uso desses coagulantes convencionais.	Tanino hidrolisável; floculação com metais;

Fonte: Elaborado pela autora.

O primeiro critério utilizado para a seleção das referências foi o período de cinco anos de publicação, ou seja, entre os anos de 2019 e 2024. Entretanto, aquelas que estavam fora deste período mas eram aderentes ao tema, principalmente no que se referiu às strings relacionadas à presença de taninos de alta concentração em espécies vegetais; eficiência da utilização dos taninos vegetais na purificação de águas residuárias de origem industrial; eficiência da utilização de taninos vegetais no processo de floculação de partículas de minério; eficiência da floculação de partículas de hidrocarbonetos utilizando taninos vegetais também foram priorizadas.

Analisando as publicações por ano, foi possível perceber que entre 2018 e 2021 houve um número constante de publicações sobre as strings utilizadas, o que não ocorreu de 2015 a 2018, uma vez que o tema apresentou avanço nas pesquisas somente a partir de 2018. O mesmo não pode ser previsto para taninos e relação com hidrocarbonetos e águas oleosas, uma vez que há escassez de trabalhos publicados, sendo necessário o desenvolvimento desta linha de pesquisa. Assim, as poucas referências que foram encontradas por meio das strings foram selecionadas, independente do ano de publicação.

6 Considerações Finais

Foi possível concluir que a utilização de taninos no tratamento de metais presentes em efluentes líquidos industriais apresentou eficácia e resultados promissores de acordo com as bibliografias encontradas, o que também indicou a mesma linha de pesquisa bem sucedida para a utilização em se tratando de minério de ferro. Entretanto, a variabilidade de espécies vegetais tanínicas utilizadas identificadas na revisão sistemática foi baixa, o que corroborou a presente pesquisa no que diz respeito à utilização de espécies ainda não testadas.

Além disso, as referências identificadas apresentaram pesquisas que utilizaram taninos vegetais para o tratamento de efluentes industriais com resíduos de compostos oleosos, mas a utilização dos mesmos em água contaminada diretamente por hidrocarbonetos é escassa, indicando a necessidade de realização de novos estudos.

Referências Bibliográficas

- [1] INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Gestão para a sustentabilidade na mineração: 20 anos de história**. 1.ed. Brasília: IBRAM, 2013. 168 p. Disponível em: <www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00004089.pdf>. Acesso em 27 jan. 2022.
- [2] AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GAS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Crescimento das atividades petrolíferas na Bacia de Campos**. Disponível em <<https://www.gov.br/anp/pt-br>>. Acesso em fevereiro de 2022.
- [3] MUNIZ, D.H.F, OLIVEIRA-FILHO, E.C. Metais pesados provenientes de rejeitos de mineração e seus efeitos sobre a saúde e o meio ambiente. *Universitas: Ciências da Saúde*, v. 4, n. 1 / 2, p. 83-100, 2006.
- [4] SILVA, P.K.L, DANTAS NETO, A.A., MELO, J. **Remoção de óleo de água de produção por flotação em coluna utilizando tensoativos de origem vegetal**. Natal: UFRN, 2008. Dissertação de Mestrado.
- [5] LIMMER, F.C. O licenciamento ambiental da indústria petrolífera. *Revista Brasileira de Direito do Petróleo, Gás e Energia*. v.5, n.1, p.225-242, 2018.
- [6] ANDRADE, M. C., BARBATO, C. N., FRANÇA, S. C., LUZ, A. B. **Adsorção e quantificação de aminas em efluentes de mineração**. Série Anais da XII Jornada de Iniciação Científica – CETEM, 2004.
- [7] SANTOS, M.A. **A flotação por ar dissolvido como alternativa ao tratamento de efluente mineral visando ao reuso da água e à melhoria do processo de flotação de apatia**. Uberlândia: UFU, 2014. Dissertação de mestrado.
- [8] LEE, C.S, ROBINSON, J., CHONG, M.F. A review on application of flocculants in wastewater treatment. *Process Safety and Environmental Protection*: v.92, Iss.6, nov.2014, p.489-508.
- [9] SANTOS, C.T. **Influência do tamanho molecular aparente de substâncias húmicas aquáticas na eficiência da coagulação por hidróxido de alumínio**. São Carlos: UFSCAR, 2009. Dissertação de mestrado.
- [10] RUBIO, J.; OLIVEIRA, C.; SILVA, R. Aspectos ambientais nos setores mineiro e metalúrgico. In: SILVA, A.A. Reavaliação de Circuito de Flotação Convencional de Minério de Ferro. Dissertação (mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p.98, 2016. Disponível em <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUBDAEAG9N/disserta_o_de_mestra_do_airton_final.pdf?sequence=1>. Acesso em março de 2024.
- [11] SILVA, J.; GOMES, L.P.; DECUSATI, O.; LAMB, L.H. Aplicação de flocculante vegetal no tratamento de águas – A experiência da TANAC S.A. e a proposta de pesquisa com a UNISINOS. In: **IV Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental, Porto Alegre, RS**. CD ROM... Porto Alegre, ABES-RS, 2004..
- [12] MELLO, J. P. C.; SANTOS, S. C. **Em Farmacognosia: da planta ao medicamento**. Simões, C. M. O.; Schenckel, E. P., orgs. Porto Alegre: Editora UFSC. 2010. 3.ed.
- [13] RIZZINI, C. T.; MORS, W. B. **Botânica econômica brasileira**. São Paulo: EPU/ Editora da Universidade de São Paulo, 1976. 207 p.
- [14] SILVA, A.A. Reavaliação de Circuito de Flotação Convencional de Minério de Ferro. Dissertação (mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p.98, 2016. Disponível em <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUBDAEAG9N/disserta_o_de_mestra_do_airton_final.pdf?sequence=1>. Acesso em março de 2024.

- [15] PAULO, P.L.; AZEVEDO C.; BEGOSSO, L.; GALBIATI A.F.; BONCZ M.A. Natural systems treating greywater and blackwater on-site: Integrating treatment, reuse and landscaping. Federal University of Mato Grosso do Sul, Campo Grande, MS. **Brazil Ecological Engineering** 50 ,95– 100, 2013.
- [16] SOUSA, Thais Brito. **Uso de taninos de espécies florestais no tratamento de água para abastecimento**. Lavras: UFLA, 2015. Dissertação de mestrado.
- [17] COOPER, I. Diane. What is a “mappingstudy?” **Journal of the Medical Library Association: JMLA**, v. 104, n. 1, p. 76, 2016.
- [18] CAMPANA, A.O. Metodologia da investigação científica aplicada à área biomédica. **J Pneumol** 25(2) – mar-abr de 1999.
- [19] PETERSEN, K., VAKKALANKA, S., AND KUZNIARZ, L. (2015). Guidelines for conducting systematic mapping studies in software engineering: An update. **Information and Software Technology**, 64:1 – 18.
- [20] BUDGEN, D., TURNER, M., BRERETON, P., AND KITCHENHAM, B. A. (2008). Using mapping studies in software engineering. *In* **PPIG**, volume 8, pages 195–204. BUDGEN, D., TURNER, M., BRERETON, P., AND KITCHENHAM, B. A. (2008). Using mapping studies in software engineering. *In* **PPIG**, volume 8, pages 195–204
- [21] KITCHENHAM, B. AND CHARTERS, S. (2007). **Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering**.
- [22] KITCHENHAM, B., BRERETON, O. P., BUDGEN, D., TURNER, M., BAILEY, J., AND LINKMAN, S. (2009). Systematic literature reviews in software engineering—a systematic literature review. **Information and software technology**, 51(1):7–15.
- [23] LUZ, D.L., ZUFO, A.C. o fenômeno de hurst nos estudos de séries temporais de chuva: um mapeamento sistemático da literatura. **In.**: XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (anais). . Foz do Iguaçu, nov.2019.
- [24] ECO, Umberto; SEBEOK, Thomaz A. **O signo de três**. 2. Reimpressão. São Paulo: Perspectiva, 2008.
- [25] MOREIRO, A., JOSÉ, G. (2011). *Linguagens documentárias e vocabulários semânticos para a web: elementos conceituais*. Salvador: EDUFBA.
- [26] PREFERRED REPORTING ITEMS FOR SYSTEMATIC REVIEWS AND META-ANALYSES (PRISMA). Métodos de mapeamento sistemático e revisão sistemática. Disponível em < <http://www.prisma-statement.org/>>. Acesso em fevereiro de 2024.

Estudo de Viabilidade Técnica de Solos para Paredes em Taipa de Pilão *Soils Technical Feasibility Study for Walls in Rammed Earth*

Anderson Renato Vobornik Wolenski, Doutor em Engenharia de Estruturas, Professor do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC)

anderson.wolenski@ifsc.edu.br

Andreza Frare, Mestra em Engenharia Civil, Professora do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC)

andreza.frare@ifsc.edu.br

José Eduardo Mendes de Lima, Mestrando em Engenharia Civil, Professor do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC)

jose.mendes@ifsc.edu.br

Emilia Teixeira Poltronieri, Graduanda de Engenharia Civil do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC).

emilia.tp@aluno.ifsc.edu.br

Thomas Camponogara Aires da Silva, Graduando de Engenharia Civil do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC).

thomas.ca2002@aluno.ifsc.edu.br

Resumo

Edificações sustentáveis permeiam temáticas que usam métodos construtivos associados a materiais e tecnologias inovadoras. A busca destes temas visa romper o paradigma da construção civil que visualiza, nos materiais não renováveis, a única forma exitosa em uma edificação. Como destaque, a taipa de pilão possibilita construções mais sustentáveis, com menor consumo energético e conforto termo-acústico ideais, dentre outros avanços recentes, o que inclui a ABNT NBR 17014 [1], que traz consigo grande expectativa para expansão deste sistema construtivo. Neste contexto, o presente artigo buscou caracterizar dois solos do município de Palmeiras das Missões-RS, para fins de execução de paredes experimentais e autoportantes com o sistema construtivo em taipa de pilão, com o objetivo de conceber edificações mais sustentáveis, saudáveis e acessíveis, técnica e economicamente.

Palavras-chave: Palmeiras das Missões-RS; Terra; Sustentabilidade; Sistema Autoportante.

Abstract

Sustainable buildings permeate themes that use construction methods associated with innovative materials and technologies. The search for these themes aims to break the civil construction paradigm that sees non-renewable materials as the only successful form in a building. As a highlight, rammed earth enables more sustainable constructions, with lower energy consumption and ideal thermoacoustic comfort, among other recent advances, which includes the ABNT NBR 17014 [1], which brings with it great expectations for expansion of this construction system. In this context, this article sought to characterize two soils in the municipality of Palmeiras das Missões-RS, for the purpose of implementing experimental and self-supporting walls using the rammed earth, with the aim of designing more sustainable, healthy and accessible buildings, technically and economically.

Keywords: *Palmeiras das Missões-RS; Earth; Sustainability; Self-supporting System.*

1. Introdução

O setor da construção civil desempenha um papel importante no desenvolvimento socioeconômico, mas também é reconhecido como um dos principais contribuintes para o impacto ambiental global. Um dos aspectos abordados em [2] é o uso significativo de recursos naturais como matéria-prima e o consumo substancial de energia na cadeia produtiva, em especial, na transformação e transporte dos materiais adotados.

A integração da terra como componente construtivo promove mudanças significativas, tornando a cadeia produtiva da construção civil mais sustentável, orgânica, saudável e economicamente acessível. Essas mudanças são evidentes ao considerar as técnicas que empregam o compósito solo-cimento como principal material constituinte em uma edificação. Essas técnicas compartilham a característica de minimizar os impactos ambientais negativos, quando comparadas aos insumos tradicionais e não renováveis, como o cimento e o aço, que se destacam como significativos emissores de CO₂, contribuindo substancialmente para o efeito estufa [3].

Neste cenário, o uso da terra é relevante por ser *in natura* e amplamente disponível, e por apresentar propriedades favoráveis como as higrotérmicas, acústicas, de resistência ao fogo, atoxicidade e capacidade de reciclagem ao final de sua vida útil [4].

Entre os sistemas construtivos com terra disponíveis, os mais comuns no Brasil atualmente, tanto para novas construções quanto para restaurações, incluem os blocos de adobe, os blocos de solo-cimento comprimidos, a técnica de taipa de mão (pau-a-pique) e a taipa de pilão. Historicamente, a taipa foi amplamente adotada no período colonial no Brasil [5]. Contudo, de acordo com uma pesquisa conduzida por Pinheiro [6], a taipa de pilão tem sido a preferência predominante. Wolenski [7] afirmam, por sua vez, ser essencial o desenvolvimento de pesquisas que viabilizem o uso do solo como um material inovador dentro de um processo construtivo capaz de contribuir para uma construção civil mais eficiente, energética e economicamente, e que amplie o campo de atuação de profissionais que buscam inovar, de modo sustentável, em seus projetos de edificações.

A incorporação dos ditos Materiais km 0 tem contribuído muito para mudar este paradigma cíclico da construção civil, vez que esses materiais podem ser adquiridos localmente, sem necessidade de transporte ou transformação, e que, no fim da sua vida útil, podem facilmente ser reincorporados ao ambiente [8]. Esta visão sistêmica sobre a manufatura e o uso dos materiais de uma edificação é resultado de um necessário movimento de incentivo ao uso de insumos locais e que incorporem uma industrialização mínima [9]. Tal abordagem busca proporcionar construções mais sustentáveis, saudáveis, econômicas, socialmente acessíveis e identificadas com o lugar onde estão inseridas.

É importante ressaltar que a técnica de construção com terra, com o sistema em taipa de pilão, não é uma novidade no Brasil, visto que várias construções históricas mantêm essa técnica por trás de seus revestimentos e pinturas caiadas. No entanto, essa técnica caiu em desuso no início do século XIX com a popularização do cimento *Portland*. De acordo com Minke [10], as construções com terra são conhecidas há mais de nove mil anos, sendo amplamente usadas em diversas culturas antigas, tanto em residências quanto em templos e estruturas religiosas, que remontam a pelo menos cinco mil anos.

Os materiais de terra crua, possuem massa térmica elevada, isto é, conseguem absorver calor, retê-lo e, em seguida, liberá-lo com o tempo. Tal característica auxilia o sistema

construtivo a moderar significativamente as flutuações térmicas dentro de uma casa [11] oferecendo um maior conforto térmico para o usuário.

Minke [10] destaca que a taipa de pilão ainda é usada em diversos países, todavia, a emergência do uso de métodos e materiais mais sofisticados e de ferramentas mais apropriadas, como formas moduladas e apiloadores pneumáticos, tem possibilitado a execução desta técnica de modo mais eficiente, tornando seu uso mais expressivo, mesmo nos países desenvolvidos, dada a sua viabilidade econômica e o caráter ecológico do seu material, que tem o solo como elemento base.

Um dos primeiros países a empregar tecnologia neste sistema construtivo foi o Egito, através do arquiteto Hassan Fathy da Universidade do Cairo, onde a partir da inserção de novos equipamentos, métodos, ferramentas e design, revelaram novas possibilidades para o uso da taipa de pilão [12].

As pesquisas mais recentes sobre a taipa de pilão visam desenvolver composições que proporcionem aprimoramentos nas características físico-mecânicas. Além disso, nota-se um interesse crescente em métodos que possam elevar a eficiência na construção com este sistema, assim como a qualidade das estruturas resultantes [13].

Da mesma forma, a presente proposta de pesquisa está pautada em questões de cunho técnico, baseadas em uma agenda Ambiental-Cultural-Econômica [14], fundamentada na originalidade e sustentabilidade de materiais extraídos *in loco*, mas precisamente de solos do município Palmeiras das Missões, região noroeste do Rio Grande do Sul, a fim de agregar tecnologia na caracterização físico-mecânica destes solos e executar paredes autoportantes a partir do método construtivo em taipa de pilão.

2. Procedimentos Metodológicos

As etapas experimentais deste trabalho foram pautadas no correto procedimento metodológico intrínseco de cada ensaio, assim como, seguiram rigorosamente as normas técnicas de classificação da terra adotada como principal material constituinte das paredes em taipa de pilão. Assim, todo procedimento metodológico pautou-se nas normas de caracterização físico-mecânica do solo e cimento, além de trabalhos científicos (normatizados e/ou empíricos) que auxiliaram no entendimento das metodologias aqui adotadas.

2.1. Caracterização física

Este artigo partiu da seleção de dois solos (salmão e amarelo) encontrados no noroeste do Rio Grande do Sul, mais precisamente, no município de Palmeira das Missões-RS. Atentou-se aos experimentos necessários para ratificar sua aplicabilidade. Para tanto foi fundamental conhecer as características físicas do solo (extraídos *in loco*), para verificar sua conformidade em termos de coesão, compactação e composição granulométrica.

Os dois solos são oriundos da mesma mineração, contudo, de pontos distintos de coleta, o que resulta na coloração distinta entre eles, assim como percentuais distintos de areia e material argiloso, percentuais estes que foram obtidos via análise granulométrica perante a ABNT NBR 7181 [15], capaz de determinar as frações fina e grossa presentes no solo estudado. Além disso, verificou-se os limites de liquidez e plasticidade normatizados, respectivamente, pelas normas ABNT NBR 6459 [16] e ABNT NBR 7180 [17].

2.2. Caracterização mecânica

Os corpos de prova (CPs) foram moldados por compactação, com quatro camadas de mesma altura e compactadas com 10 golpes por camada, segundo a ABNT NBR 12023 [18]. A mistura foi espalhada dentro do molde para CPs de 15x10 cm, com quantidade suficiente para produzir uma camada compactada de mesma altura, dentre as quatro camadas necessárias até atingir uma altura total de 125mm, com diâmetro de 100mm.

Os CPs foram rompidos para a idade de 28 dias para determinação da resistência à compressão do solo-cimento compactado [19]. Adotou-se uma taxa de incremento de tensão de $(0,25 \pm 0,10)$ MPa/min, em uma prensa servo controlada com capacidade máxima de 1.000 kN (Intermetric iM Unique 2223[®]).

Para estabilização intergranular e melhor empacotamento das partículas do solo, adotou-se um percentual de 10% em adição de cimento CP V-ARI-RS, em relação à massa total de solo, a fim de obter um material de baixa permeabilidade, elevada densidade e capacidade de carga mínima de 2 MPa, conforme exigência da ABNT NBR 17014 [1] para atestar seu uso em paredes autoportantes. Embora o CP-V ARI possua um alto teor de clínquer e, conseqüentemente, um maior nível de emissão de CO₂, o mesmo foi escolhido, para fins de pesquisa, a fim de evitar a inclusão da variabilidade intrínseca relacionada aos cimentos compostos (CP II e CP IV), que a depender do lote de fabricação, podem resultar em percentuais distintos de adição de resíduos e interferir na análise das amostras.

3. Resultados e Discussões

Os resultados foram divididos conforme a caracterização física e mecânica do solo-cimento compactado, fruto principal deste estudo. Ao longo dos resultados, quando se refere ao solo, faz-se referência a mistura de 100% do solo em questão com 10% de cimento para fins de estabilização, como forma de alcançar um melhor empacotamento das partículas e coesão durante o processo de compactação dos corpos de prova e de melhorar a resistência mecânica à compressão das amostras.

3.1. Caracterização física

Na Figura 1 são apresentados dados referentes aos ensaios de granulometria. Observa-se que os solos são constituídos por mais de 80% de material arenoso (partículas maiores que 0,075mm). Nesse sentido, não houve a necessidade de correção desta mistura com solos de granulometria mais fina (argilosos), a não ser a estabilização com cimento *Portland*.

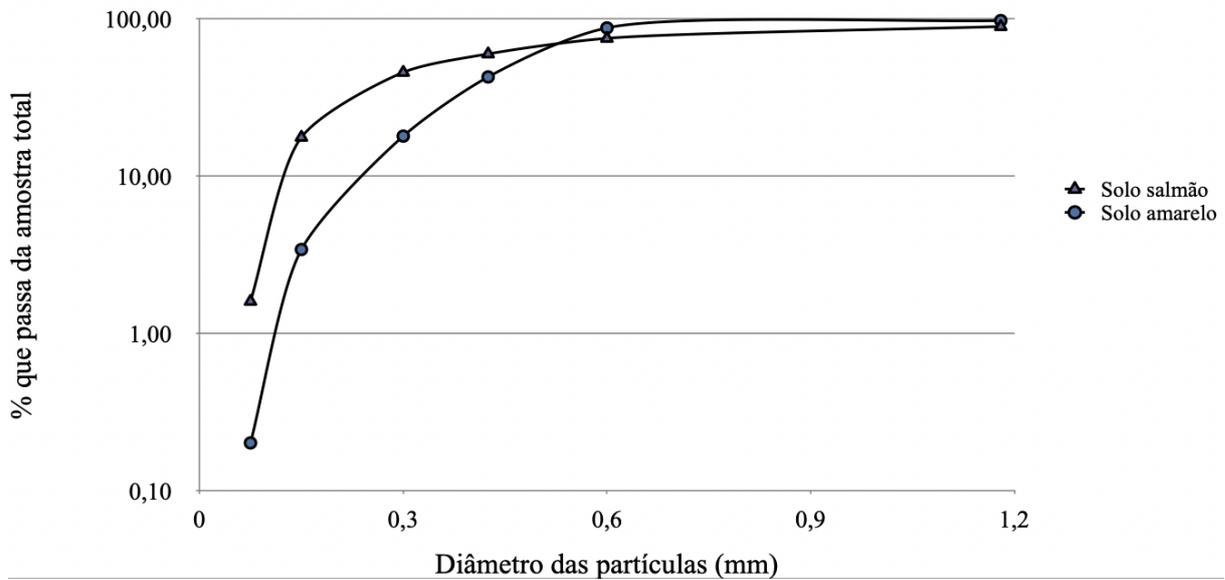


Figura 1: Granulometria dos solos utilizados no estudo. Fonte: autores.

Sobre o ensaio de sedimentação, o solo amarelo é constituído de 5,98% de argila, 5,04% de silte e 88,98% de areia, enquanto que o solo salmão é constituído de 4,60% de argila, 13,70% de silte e 81,70% de areia. Já os valores obtidos para o limite de liquidez para o solo salmão e amarelo, foram respectivamente 22,4% e 17,5%, conforme apresentado na Figura 2.

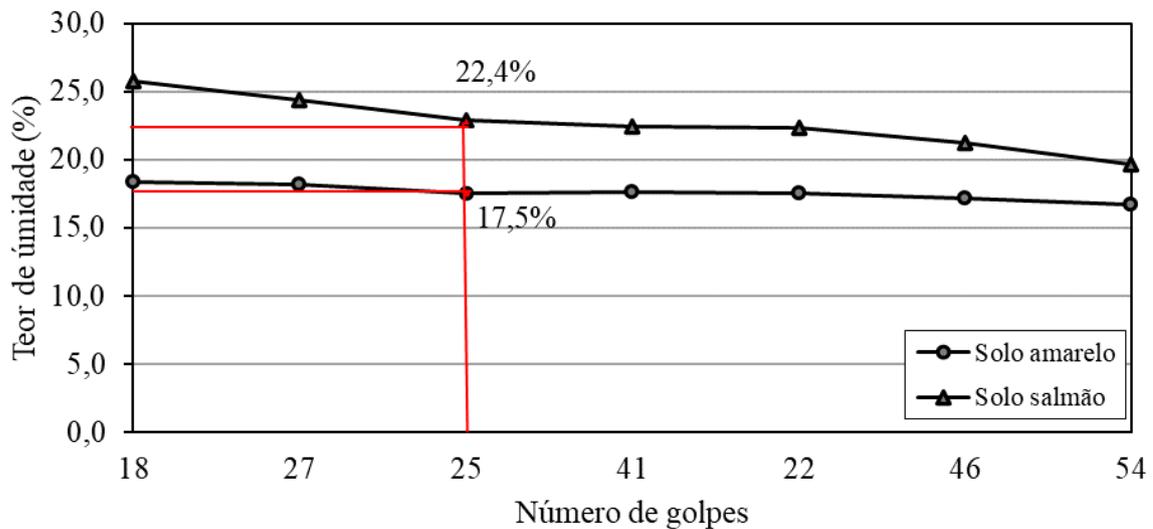


Figura 2: Ensaio de Casagrande - Limite de Liquidez. Fonte: autores.

No geral, para paredes em taipa de pilão é comum encontrar solos com limites de liquidez na faixa entre 20% e 40%. Essa condição permite a melhor manipulação do solo durante o processo de compactação, garantindo uma boa coesão sem comprometer a trabalhabilidade.

3.2. Caracterização mecânica

A análise dos resultados obtidos na avaliação da resistência mecânica, conforme estabelece a ABNT NBR 17014 [1], revelou dados significativos acerca do potencial de uso deste material em aplicações construtivas. A Figura 3 ilustra as amostras durante e após o rompimento em prensa hidráulica servo controlada.



Figura 3: CPs elaborados para ensaio de resistência mecânica: (a) antes e (b) após o rompimento. Fonte: autores.

Por fim, a Figura 4 traz os resultados das resistências à compressão para os solos estudados, com os valores médios e o intervalo de confiança (IC) para 95% de confiabilidade.

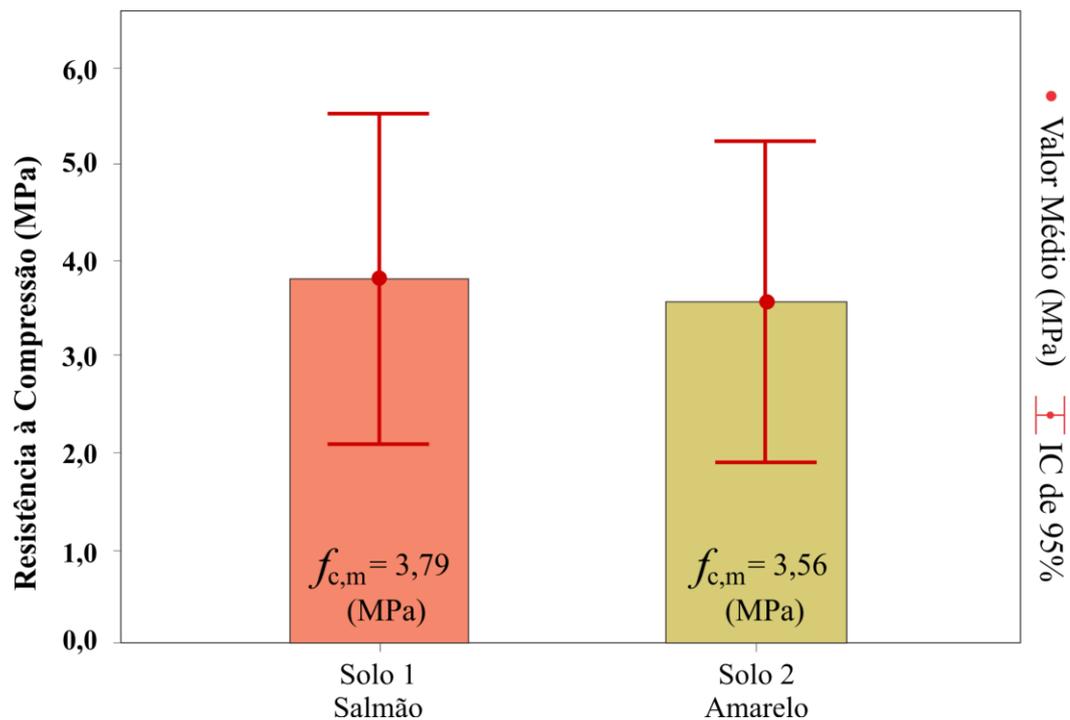


Figura 4: Resultados para resistência à compressão para os solos 1 e 2 (salmão e amarelo). Fonte: autores.

Os valores médios observados de 3,79 MPa e 3,56 MPa para os solos salmão e amarelo, respectivamente, indicam uma adequação às faixas normativas, sugerindo que os solos, sob as condições testadas, atende aos critérios mínimos de 2 MPa para consideração como material construtivo viável para a aplicação em paredes autoportantes em taipa de pilão.

3.3. Parede Experimental em Taipa de Pilão

A parede confeccionada nas práticas experimentais demonstrou bons resultados do ponto de vista da durabilidade, resistência e aparência, seja pela sua textura, coloração e rusticidade. Para a parede adotou-se em média 100 kg de material, o que resultou em um volume de 22x55x58 cm³ de parede compactada, o que leva a necessidade de aproximadamente 1425 kg de material para a produção de 1 m³ de parede em Taipa de Pilão com os solos pesquisados. Tais dados resultam num peso específico de 2200 kg/m³, considerado elevado quando comparado ao concreto armado convencional, por exemplo.

Observa-se na Figura 6 que a parede em questão não apresentou fissuras e alcançou uma aparência e textura ideais para seu futuro uso em paredes autoportantes de uma edificação.

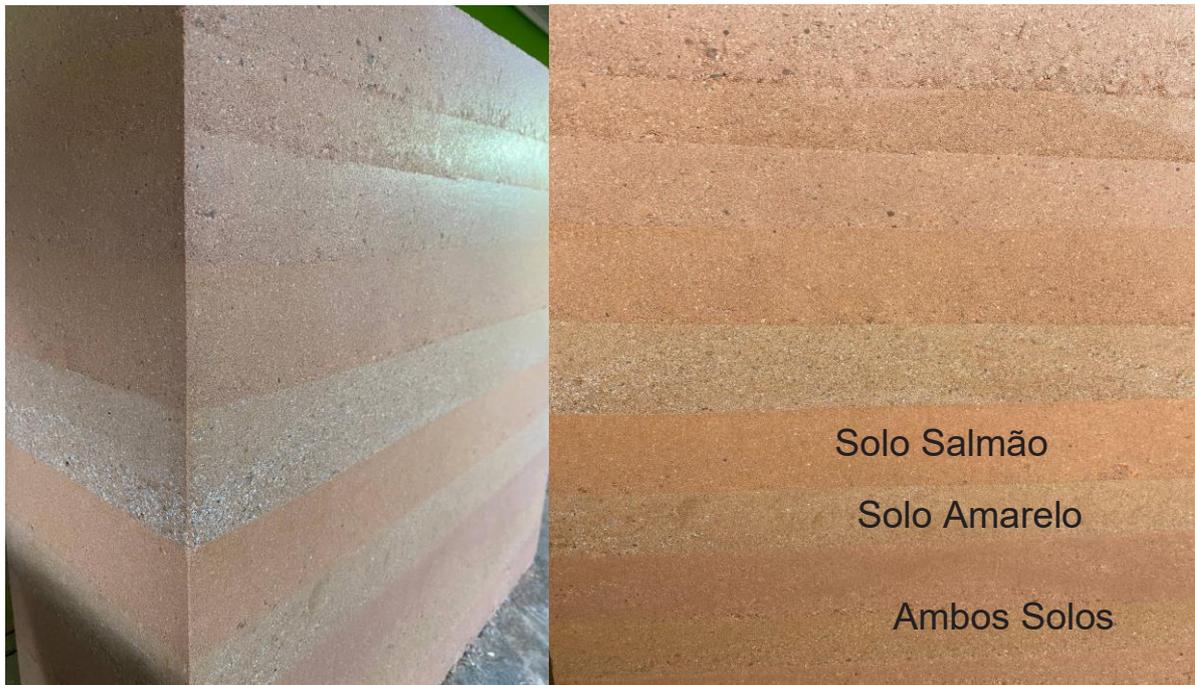


Figura 6: Parede experimental ideal com os solos 1 e 2. Fonte: autores.

No estudo de caso analisado, a boa execução da parede em taipa de pilão foi avaliada, evidenciando as nuances que definem o sucesso desta técnica construtiva ancestral. A seleção do material com proporções maiores de material arenoso, juntamente com o controle preciso da umidade e a técnica de estabilização adotada, emergiu como um fator crítico, assegurando a homogeneidade e a compactação eficaz do material e, por consequência, em uma parede de ótima aparência, livre de esfarelamento, trincas ou qualquer outro tipo de patologia.

Por fim, algumas ponderações são importantes de serem elucidadas acerca dos experimentos supracitados, com destaque a dois pontos principais:

- 1) avaliar outros percentuais de mistura, solo e cimento, parece oportuno, uma vez que a alteração da composição granulométrica e do empacotamento das partículas parece ser o principal fator de ganho de resistência mecânica;
- 2) os ensaios de DRX e de granulometria a laser são importantes para uma versão expandida deste trabalho, a fim de avaliar a mineralogia dos solos e aprimorar a caracterização para fins de uma execução correta das paredes em taipa de pilão.

5. Considerações Finais

O bom desempenho construtivo da taipa de pilão é influenciado pela seleção criteriosa do solo, considerando a proporção ideal de seus componentes, juntamente com o controle preciso da umidade e da escolha adequada do material para sua estabilização, além da execução bem sucedida da técnica, que vai desde o uso correto de fôrmas de madeira plastificada e estruturas de contenção bem projetadas, capazes de resultar em paredes monolíticas robustas, com superfícies lisas e uniformes, fundamentais para a estabilidade estrutural e apelo estético de uma parede autoportante em taipa de pilão bem executada.

Os solos analisados mostraram-se promissores para o desenvolvimento do estudo e sucesso desta técnica construtiva ancestral. O mesmo atendeu o requisito mínimo de resistência à compressão exigida pela norma, permitiu a criação de paredes monolíticas robustas, com superfícies lisas e uniformes. O trabalho destacou ainda, a contribuição como um estudo de relevo para a criação de uma nova cadeia produtiva, na região noroeste do Rio Grande do Sul, que incorpore o uso dos solos aqui caracterizados aplicados no sistema da taipa de pilão, sendo este um método sem qualquer pesquisa protocolada na região.

A junção destes pontos, portanto, foi essencial para caracterizar, do ponto de vista físico e mecânico, dois solos da região, a fim de viabilizar sua utilização como um novo processo construtivo, aliado a um material natural, abundante e limpo, em edificações que contribua para uma construção civil mais eficiente, energética e econômica, que amplie o campo de atuação de profissionais que buscam inovar, de modo sustentável, em seus projetos.

Portanto, a execução bem-sucedida de uma parede em taipa de pilão, conforme observado neste estudo de caso, reforça o potencial desta técnica não apenas como uma opção construtiva ecológica, mas também como uma solução viável e eficiente para a construção contemporânea, desde que acompanhada de um entendimento suficiente de suas demandas técnicas e operacionais. Como estudos futuros, ressalta-se a relevância das características para interpretar os aspectos químicos e micro estruturais dos dois solos aqui estudados, o que poderá melhorar ainda mais o desempenho do mesmo para a presente aplicação.

Referências

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17014: Taipa de pilão – requisitos, procedimentos e controle**. Rio de Janeiro, 2022.
- [2] NEVES, C.; FARIAS, O. B. (2011). **Técnicas de construção com terra**. Bauru: FEB-UNESP/PROTERRA. Disponível em: <http://www.redproterra.org>.
- [3] WOLENSKI, A.R.V.; BARIVIEIRA, C.A.; KOPPE, E.; BORÇATO, A.G.; WELTER, E.L., **Avaliação físico-mecânica de solos para execução de paredes autoportantes em taipa de pilão**. Revista Impact Projects, Santana do Araguaia, PA, 2023a.
- [4] PACHECO-TORGAL, F.; JALAL I, Said. **Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction**. Construction and building materials, v. 29, p. 512-519, 2011. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054>.
- [5] CORDEIRO, Carol C. M.; BRANDÃO, Douglas Q.; DURANTE, Luciane C.; CALLEJAS, Ivan J. A. **Construções vernáculas em terra: perspectiva histórica, técnica e**

contemporânea da taipa de mão. PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção, Campinas, SP, v. 10, p. e01906, jan. 2019. DOI: <http://doi.org/10.20396/parc.v10i0.8651212>.

[6] PINHEIRO, L.; RANGEL, B.; GUIMARÃES, A., SILVA, A. **Panorama da produção de obras em terra crua com design contemporâneo nos últimos 60 anos no Brasil.** In: Congresso Internacional de História da Construção Luso-Brasileira, 2016, Porto: CEAU-FAUP, 2016.

[7] WOLENSKI, A.R.V.; HEUSER, C.A.; WELTER, E.L.; KOPPE, E.; BARIVIEIRA, C.A. **Caracterização físico-mecânica de solo-cimento para fins de produção de paredes em taipa de pilão.** In: ENSUS 2023 - XI Encontro de Sustentabilidade em Projeto - UFSC - Florianópolis, SC, São Carlos, SC, 2023b.

[8] SOUZA, E. (2021). **Materiais a 0 km e a ideia de preservar o meio ambiente e as culturas locais.** ArchDaily Brasil. Acessado via www.archdaily.com.br.

[9] CALDAS, L. R.; MARTINS, A. P. de S.; TOLEDO FILHO, R. D. **Construção com terra no Brasil: avaliação ambiental da taipa de pilão.** PARC Pesq. em Arquit. e Constr., Campinas, SP, v. 12, p. e021015, 2021.

[10] MINKE, G. **Manual de construção com terra: a terra como manual de construção e seu uso na arquitetura.** Lauro de Freitas: Solisluna, 2022. 224 p. Traduzido por Jorge Simões.

[11] LOVEC, Vesna B.; JOVANOVIĆ-POPOVIĆ, Milica Dj.; ŽIVKOVIĆ, Branislav D. **THE THERMAL BEHAVIOUR OF RAMMED EARTH WALL IN TRADITIONAL HOUSE IN VOJVODINA Thermal Mass as a Key Element for Thermal Comfort.** THERMAL SCIENCE: Year 2018, Vol. 22, Suppl. 4, pp. S1143-S1155.

[12] GATTI, F. **Arquitectura y construcción en tierra: estudio comparativo de las técnicas contemporáneas en tierra.** Dissertação de mestrado. Barcelona, UPC, 2012, p. 45.

[13] MENDES, L.C.F. e BESSA, S.A.L. (2021). **Análise da evolução tecnológica da taipa de pilão contemporânea.** IX Sustentável, 8(1), 66–77, 2021.

[14] CORREIA, M.; GÓMES, F.; CARLOS, G. D.; CORREIA, J. (2014). **Reflexões do projeto versus contributo do patrimônio vernáculo para a arquitetura contemporânea sustentável.** In: 14º Seminário Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra, SIACOT. Anais. El Salvador, p. 80-87.

[15] NBR 7181 (2016). **Solo – análise granulométrica.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

[16] NBR 6459 (2016). **Solo – determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

[17] NBR 7180 (2016). **Solo – determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

[18] NBR 12023 (2012). **Solo-cimento – ensaio de compactação.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

[19] NBR 12025 (2012). **Solo-cimento: ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos: método de ensaio.** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) pelo auxílio financeiro aos projetos de pesquisa que originaram o presente artigo e a empresa De Marco Mineração, de Palmeiras das Missões-RS, pelo fornecimento dos solos estudados nesta pesquisa.

A estiagem de 2023 como evento hidrológico severo na bacia do Amazonas.

The 2023 drought as hydrologic extreme event in Amazon Basin.

Jussara Socorro Cury Maciel, doutora, Serviço Geológico do Brasil – SGB

jussara.maciell@sgb.gov.br

Luciana da Silva Loureiro, geógrafa, Serviço Geológico do Brasil – SGB

luciana.loureiro@sgb.gov.br

Renato Cruz Senna, mestre, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - Inpa

renato.senna@inpa.gov.br

Andre Luis Martinelli Real dos Santos, doutor, Serviço Geológico do Brasil – SGB

andre.santos@sgb.gov.br

Resumo

Os processos de enchente e vazante são eventos comuns em qualquer sistema hidrológico. Em alguns casos, em função de condições naturais ou antrópicas, tais eventos podem ocorrer de maneira extrema, trazendo diversos prejuízos à população. Na região Amazônica, a proximidade das comunidades com os cursos d'água e a sua alta dependência dos rios como vias de transporte, tornam a população ainda mais suscetível a eventos extremos como cheias e inundações. Este artigo visa demonstrar a evolução do evento da estiagem de 2023 na Bacia do Amazonas, que contempla os rios Solimões-Amazonas, Negro, Purus, Madeira e Branco, bem como retratar os eventos climáticos ocorridos que provocaram o evento severo na região e o papel do monitoramento hidrológico nesse contexto. Este estudo analisou os relatórios técnicos de Monitoramento climático da Bacia Amazônica e também boletins técnicos de monitoramento hidrológico da Bacia do Amazonas de 2023, emitido pelo Serviço Geológico do Brasil.

Palavras-chave: Vazante; Bacia do Amazonas; Monitoramento Hidrológico.

Abstract

Flood and drought processes are common events in any hydrological system. In some cases, due to natural or anthropogenic conditions, these events can occur in an extreme way, causing a great deal of damage to the population. In the Amazon region, the proximity of communities to watercourses and their high dependence on rivers for transportation make the population even more susceptible to extreme events such as floods. This article aims to demonstrate the evolution of the 2023 drought event in the Amazon Basin, which includes the Solimões-Amazonas, Negro, Purus, Madeira and Branco rivers, as well as portraying the climatic events that caused the severe event in the region and the role of hydrological monitoring in this context. This study analyzed the Amazon Basin technical reports on climate monitoring and also technical bulletins on hydrological monitoring in 2023 issued by the Geological Survey of Brazil.

Keywords: *Drought; Amazon Basin; Hydrological Monitoring*

1. Introdução

As enchentes e secas fazem parte do sistema hidrológico da Amazônia; esta região depende dos ciclos de cheia e vazante para manter certo equilíbrio, [1] mas nas últimas décadas, eventos hidrológicos extremo afetaram a bacia amazônica causando danos sociais consideráveis às populações ribeirinhas, ocasionando dificuldades no transporte e navegação, escassez de alimento e água.

Neste sentido, a população afetada da Amazônia carece de melhores condições locais para uma adaptação ao regime hidrológico anualmente vivenciado pela população que tende a seguir os rios como parte da moradia e subsistência.

De acordo com [2] Marengo *et al* 2011, os registros fluviais apontam, que em média, a Amazônia passa por um evento extremo, ou seja, uma seca ou enchente, a cada 10 anos. A seca de 2010 começou durante um evento de El Niño no início do verão de 2010 e depois tornou-se mais intensa no inverno e primavera seguintes. O impacto dessa seca foi perceptível nos níveis baixos do rio Amazonas e seus afluentes.

[3] Tian *et al* 2021, identificaram quatro eventos de seca severa na Amazônia (1996, 1998, 2010 e 2016) correlacionadas com nível das águas superficiais da bacia amazônica, que ocorreram principalmente na região nordeste da bacia. Segundo [4] Yu *et al* 2017, durante os períodos de seca, a precipitação e umidade ficam mais baixas do que em outros períodos, enquanto as temperaturas do ar ficam mais altas, variando de acordo com a cobertura do solo.

Certos estudos consideram que os ciclos hidrológicos dos grandes rios na Bacia Amazônica integram anomalias de temperaturas superficiais no mar (TSM) do Pacífico Equatorial (El Niño, La Niña) do Atlântico Tropical. As anomalias de TSMs desses oceanos provocam mudanças nas circulações atmosféricas e nos regimes pluviométricos em grandes áreas da Bacia Amazônica [5].

Em 2023, o processo de enchente da maioria das estações monitoradas pelo Sistema de Alerta Hidrológico (SAH) do Amazonas atingiram níveis considerados normais para os períodos de cheia, considerando os dados das séries históricas dessas estações disponíveis além do SAH, no Sistema Hidro-Telemetria da Agência Nacional de Águas - ANA. Contudo, conforme apontado por grande parte dos meteorologistas em reportagens sobre o evento da estiagem de 2023 [6], ocorreram os fenômenos climáticos El Niño e aquecimento das águas do Atlântico Norte, de forma simultânea, em que as precipitações registradas ficaram abaixo da média que resultaram em níveis baixos e descidas acentuadas, principalmente no mês de setembro, que ocasionou a maior vazante já registrada em grande parte dos postos monitorados no Amazonas, tais como Manaus, Manacapuru, Itacoatiara, Parintins, Humaitá, Beruri e Careiro da Várzea. Em Rondônia, Porto Velho também registrou a maior estiagem e, no Pará, com as estações de Óbidos e Almeirim, conforme aponta o SGB, 2023 [7].

Desta forma, o presente artigo destaca inicialmente o comportamento climático da região em 2023, por meio da consulta aos Boletins de Monitoramento Climáticos de grandes bacias, a fim de identificar o que impulsionou o evento da estiagem e na sequência, este estudo traz o diagnóstico hidrológico dos principais rios da bacia do Amazonas, com o levantamento das cotas mínimas apontadas em 2023, por meio da análise do Boletim de monitoramento dos rios da bacia do Amazonas e das previsões elaboradas pelo Serviço Geológico do Brasil – SGB/CPRM durante a vazante de 2023.

2. Procedimentos metodológicos

Para a composição e reunião de informações deste estudo, na parte climática, foram consultados os relatórios técnicos de Monitoramento climático de grandes bacias hidrográficas da Bacia Amazônica, intitulado de Boletim de Monitoramento Climático, elaborados pelos meteorologistas do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – Inpa e para a temática de hidrologia, foram consultados os boletins técnicos de monitoramento hidrológico que fazem parte do Sistema de Alerta Hidrológico do Serviço Geológico do Brasil - SGB para a Bacia do Amazonas. Na Figura 1 tem-se o resumo do método utilizado para esta pesquisa.

Para esse estudo e análise hidrológica, foi considerado como bacia do Amazonas a região que contempla as bacias dos rios Branco, Negro, Solimões, Purus e Madeira [7], como ilustrado na Figura 2. Quanto ao período principal de observação, tem-se o ano de 2023, destacando principalmente os meses de julho a novembro, que normalmente representam o período de estiagem ou vazante nesta bacia.

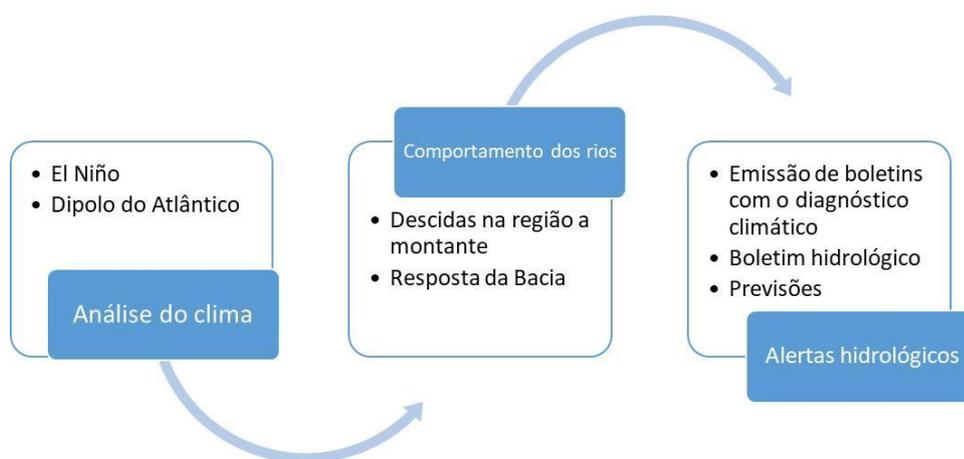


Figura 1: Sequência da análise de dados para o estudo da estiagem de 2023. Fonte: Autores.

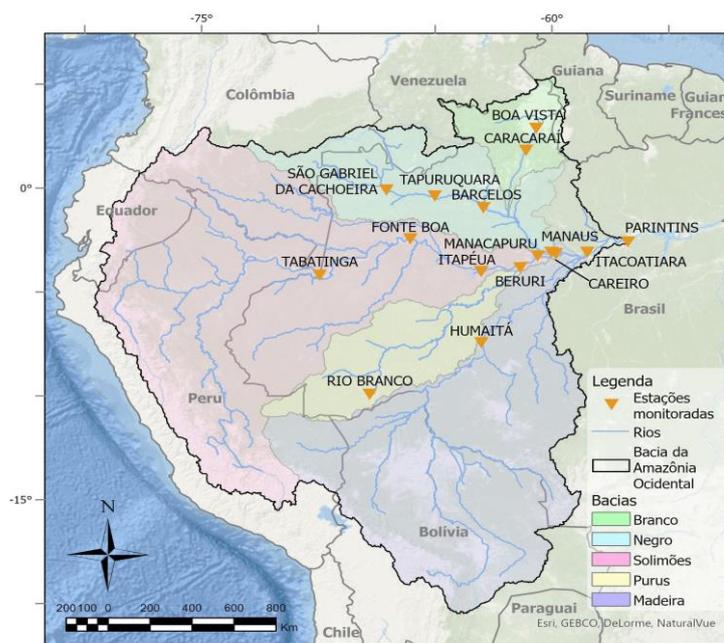


Figura 2: Bacia do rio Amazonas. Fonte: SGB (2023).

3. Aspectos Climáticos da Bacia do Amazonas em 2023.

Segundo [8] Senna *et al* (2023), entre janeiro de 2023 a abril de 2023, grandes áreas da bacia Amazônica ocidental (região que drena até as proximidades de Manaus) apresentaram volumes de chuva acima da climatologia normalmente observada no período, contudo também apresentaram precipitação abaixo da média, como é o caso da região sul da bacia do Amazonas em janeiro, da região de cabeceira (Andes) em fevereiro, a bacia do Branco RR em março e a parte norte e oeste da bacia em abril (Figura 3). Nos meses de maio, junho e julho as anomalias de precipitação, no caso abaixo da média, se espalharam em mais áreas da bacia até atingir quase sua totalidade em junho de 2023. No mês julho de 2023, o comportamento das chuvas sobre a Bacia Amazônica apresentou déficit (laranja) de precipitação caracterizando o curso principal do Amazonas em território brasileiro, tais como os rios Aripuanã, Beni, Branco, Coari, Curuá Una, Guaporé, Içá, Iriri, Japurá, Javari, Ji-Paraná, Juruá, Juruena, Jutai, Madeira, Mamoré, Marañon, bacias da margem esquerda do Amazonas no nordeste do Amazonas, nordeste e noroeste do Pará, Napo, Negro, Purus, Tapajós, Tefé, Teles Pires, Ucayali, Xingu e curso principal do Solimões (Figura 4).

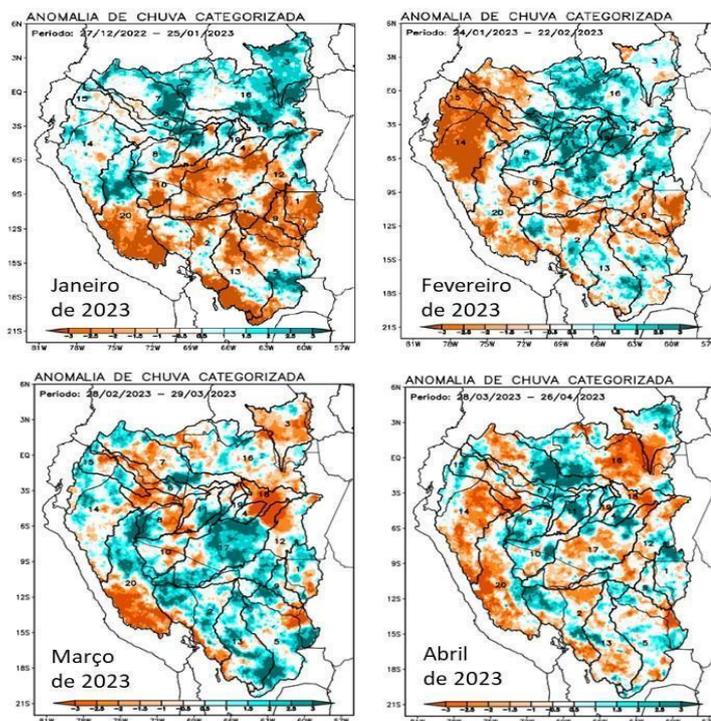


Figura 3: Acumulado de precipitação nos meses de janeiro a abril de 2023. Fonte: Cptec *apud* Senna *et al* (2023).

Durante o mês de agosto, estação seca em grande parte da região, são observados os menores volumes de precipitação sobre diversas bacias da área de monitoramento, volumes mais elevados nas bacias localizadas no norte e noroeste da região e os menores no extremo sul da área monitorada [8]. Os volumes mais baixos, com mediana inferior a 35 mm, sobre os principais rios da bacia do Amazonas, acumulados em 30 dias (Figura 3).

No mês de setembro de 2023, chuvas abaixo da climatologia predominaram em toda região, caracterizando todas as bacias monitoradas com déficit de precipitação. Os fenômenos El Niño (aquecimento das águas superficiais do Oceano Pacífico) e aquecimento anômalo das águas superficiais do Atlântico Tropical Norte favorecem uma condição de subsidência

(movimento vertical do ar de cima para baixo) sobre grande parte da região inibindo a formação de nuvens e por consequência redução dos volumes de chuva observados [8]. Tais fenômenos permaneceram nos meses seguintes de outubro e novembro de 2023 (Figura 5).

Durante o mês de setembro de 2023, as condições oceânicas, bastante anômalas, eram observadas sobre os oceanos Pacífico e Atlântico. Sobre o Pacífico (Figura 6), presença do evento El Niño (aquecimento) afetando os padrões de circulação atmosférica, com incremento substancial da convecção próximo a longitude de data (160 - 180W) e sobre parte da Amazônia Oriental era possível identificar incremento da subsidência sobre a Amazônia Oriental.

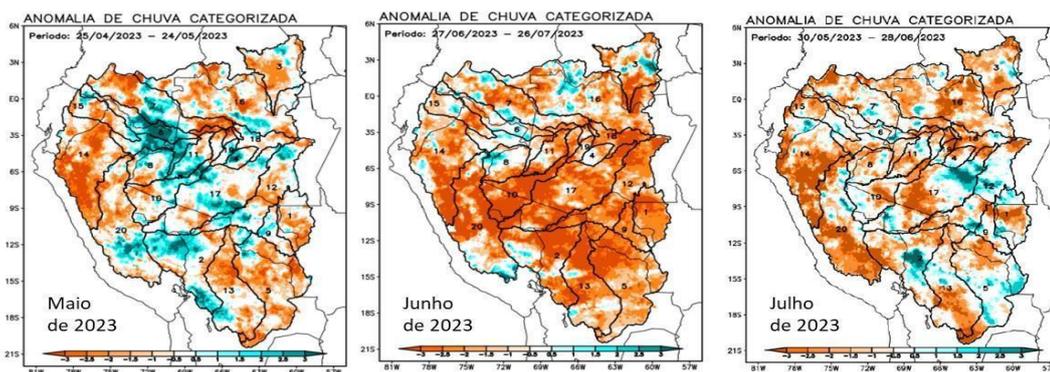


Figura 4: Acumulado de precipitação nos meses de maio a julho de 2023. Fonte: Cptec *apud* Senna *et al* (2023).

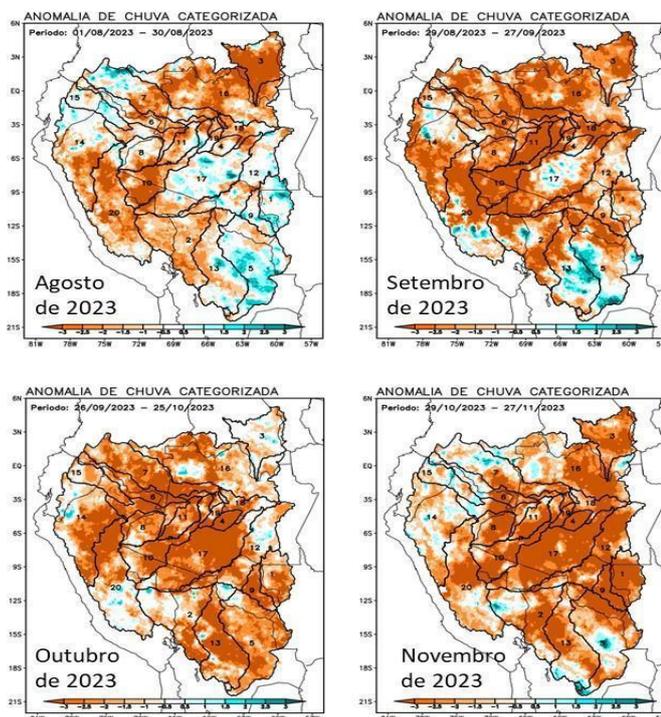


Figura 5: Acumulado de precipitação nos meses de agosto a novembro de 2023. Fonte: Cptec *apud* Senna *et al* (2023).

A Figura 7, apresenta o corte meridional (circulação de Hadley) onde evidencia claramente esta padrão de circulação fortemente afetado onde pela climatologia era esperado observar movimentos ascendentes (convecção) favoráveis a formação de nuvens sendo completamente suprimidos dando lugar a movimentos subsidentes, os quais suprimiram a formação de nuvens e ocorrências de chuvas naquela região, decorrentes do evento de aquecimento das águas

superficiais que era observado no Oceano Atlântico Tropical Norte, afetando assim o transporte de umidade atmosférica que naturalmente deveria ocorrer da Amazônia Oriental em direção à Amazônia Ocidental, com o consequente déficit de precipitação observado nas duas regiões [8].

Esses padrões climatológicos, observados desde o início de 2023, determinaram a grande magnitude do evento de estiagem observado deste ano, que configurou como a maior vazante de toda a história de monitoramento hidrológico do estado do Amazonas.

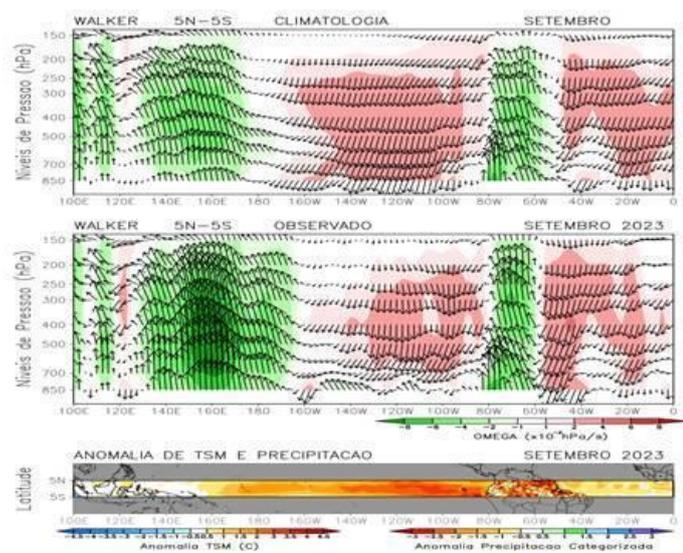


Figura 6: Circulação de Walker (zonal) durante o mês de setembro afetada pelas condições do Oceano Pacífico, quadro superior - climatologia, quadro central - circulação observada no ano de 2023; quadro inferior - anomalias de temperatura superficial sobre os oceanos e anomalia categorizada de precipitação sobre o continente. Fonte: Dados coletados do NOAA e Merge, figura gerada pelos autores (2023).

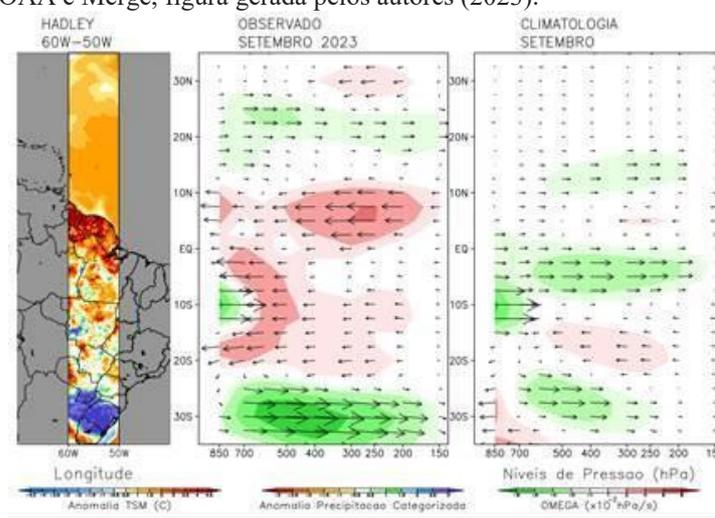


Figura 7: Circulação de Hadley (meridional) durante o mês de setembro afetada pelas condições do Oceano Atlântico, quadro direito - climatologia, quadro central - circulação observada no ano de 2023; quadro esquerdo - anomalias de temperatura superficial sobre os oceanos e anomalia categorizada de precipitação sobre o continente. Fonte: Dados coletados do NOAA e Merge, figura gerada pelos autores (2023).

4. Monitoramento da estiagem de 2023

O evento de vazante de 2023 representou para o estado do Amazonas o maior e mais impactante evento de estiagem de toda sua história de monitoramento hidrológico. Dos seus 62

municípios, 60 tiveram situação de emergência reconhecida. Na capital do estado, Manaus, onde os dados de níveis de rio são registrados desde 1902, o nível do rio Negro foi o mais baixo de todos os registros anteriores, confirmando 2023 como a maior vazante dos últimos 121 anos na região. A estiagem mais severa também foi apontada nos municípios de Manacapuru, Careiro, Itacoatiara, Humaitá, Beruri e Parintins no Amazonas e em Porto Velho em Rondônia e em Óbidos e Almeirim no Pará.

O rio Solimões é o principal formador do rio Amazonas, o comportamento do rio Solimões em seu trecho mais a jusante representa bem o que ocorre ao longo do trecho mais Ocidental do rio Amazonas. De acordo com [7] SGB (2023), para a bacia Solimões, foram registrados os níveis abaixo da faixa da normalidade desde julho e em meados de agosto e setembro apresentou descidas acentuadas nas estações de Tabatinga, Fonte Boa, Itapeua e Manacapuru (Figura 8). Em Tabatinga, o nível mais baixo do ano no Solimões ocorreu em 16/10/23, registrando -75 cm, a segunda maior vazante já registrada neste posto. Em Fonte Boa, o nível mais baixo ocorreu em 19/10/23, registrando 8,63 m, a segunda maior vazante desta estação. Em Itapeua, o Solimões atingiu seu nível mais baixo de 2023, no dia 23 de outubro, com a cota de 146 cm, 15 cm acima da maior vazante já registrada. Em Manacapuru, o rio atingiu a cota 3,11 em 26/10/23, registrando assim o menor nível da série histórica de 52 anos.

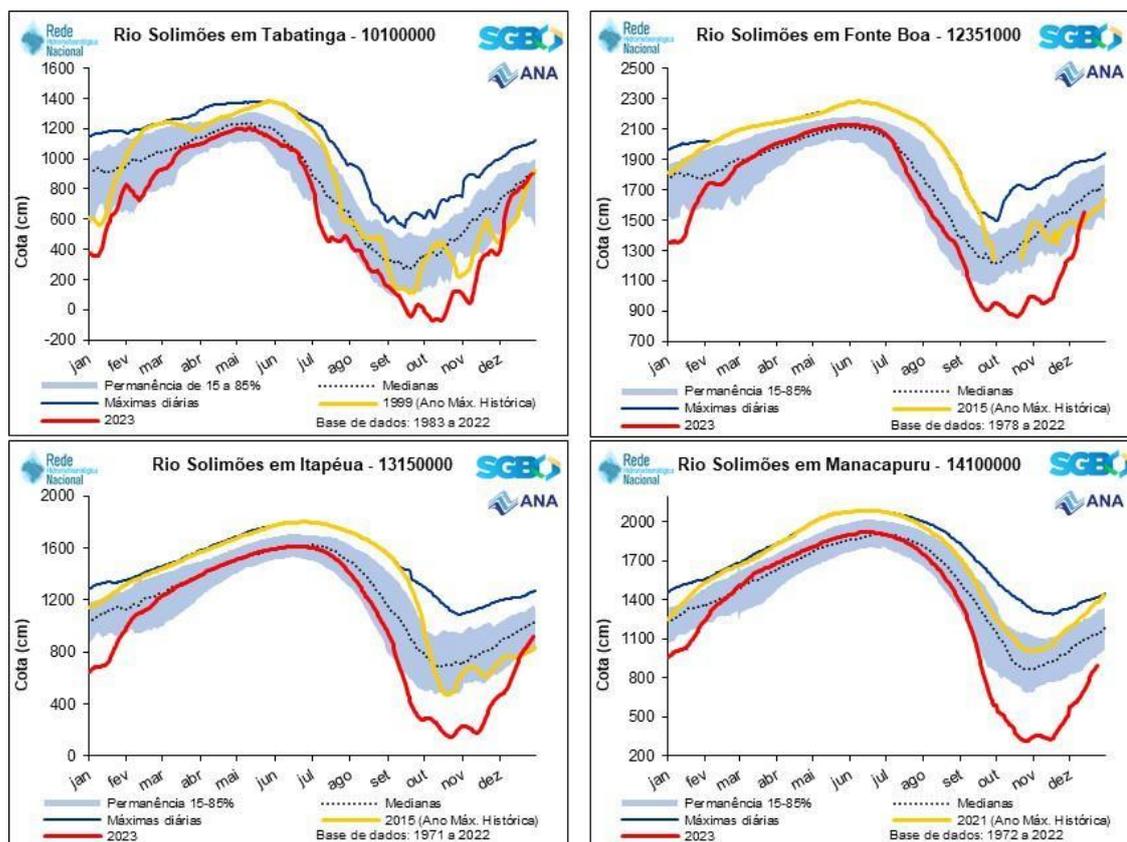


Figura 8: Cotagramas das estações monitoradas do rio Solimões em 2023. Fonte: Adaptado de SGB (2023).

No rio Negro, na região a montante, chamada de Alto Rio Negro tem regime hidrológico diferenciado das demais bacias, em que o pico da cheia ocorre em julho, o início da vazante em agosto e intervalo das mínimas desse período geralmente ocorre em fevereiro do ano seguinte. Contudo, logo no início do processo de recessão, segundo [7] SGB (2023), o rio Negro nas estações de São Gabriel da Cachoeira, Tapuruquara em Santa Isabel do Rio Negro e Barcelos

apresentou descidas acentuadas e os níveis registrados ficaram abaixo da faixa da normalidade nos meses de setembro, outubro e novembro de 2023. Em São Gabriel da Cachoeira, os níveis registrados nos meses de setembro e outubro, revelaram que o rio Negro alcançou o intervalo das mínimas, como ilustra a Figura 9.

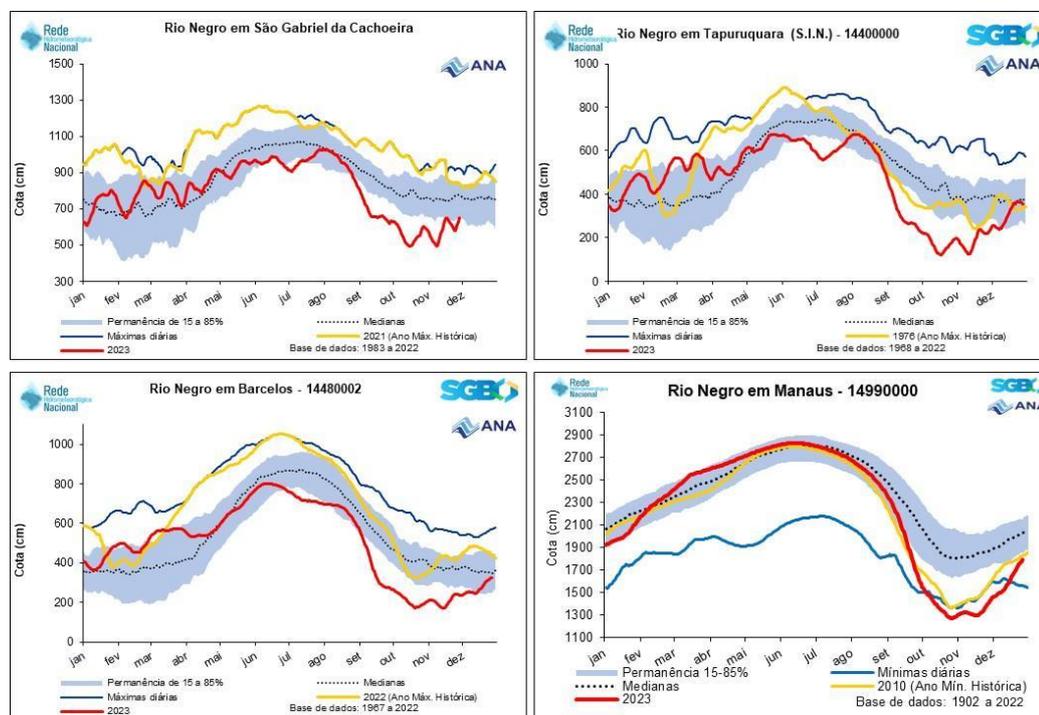


Figura 9: Cotogramas das estações monitoradas do rio Negro em 2023. Fonte: Adaptado de SGB (2023).

Ainda conforme [7] SGB (2023), na estação do Porto de Manaus, localizada no rio Negro registrou a mínima história de 12,70 m em 26/10/23, em uma série de dados de 121 anos, se compararmos com a vazante de 2010, considerada até então a maior seca da região, revelou uma diferença de 93 cm. Manaus está localizada na bacia do rio Negro, mas recebe muita influência do rio Solimões, que apresentou descidas acentuadas em setembro e os postos de monitoramento atingiram as mínimas na segunda quinzena de outubro com uma diferença de dias para Manaus. Esta estação apresentou descidas diárias acentuadas (na ordem ou acima de 30 cm) no mês de setembro por 14 dias seguidos (Figura 10), que impactou o processo de vazante na região. Com essas descidas, o nível do rio Negro nesta estação ficou abaixo do intervalo das mínimas históricas nos meses de outubro e novembro de 2023.

A figura 11 destaca a região do Porto de Manaus, no centro da cidade, em dois momentos, na cheia de 2021, onde atingiu a cota de 30,02 m e na ocasião da estiagem de 2023, com cota de 12,70 m, entre os dois eventos, registrando uma variação no nível do rio Negro de 17,82m.

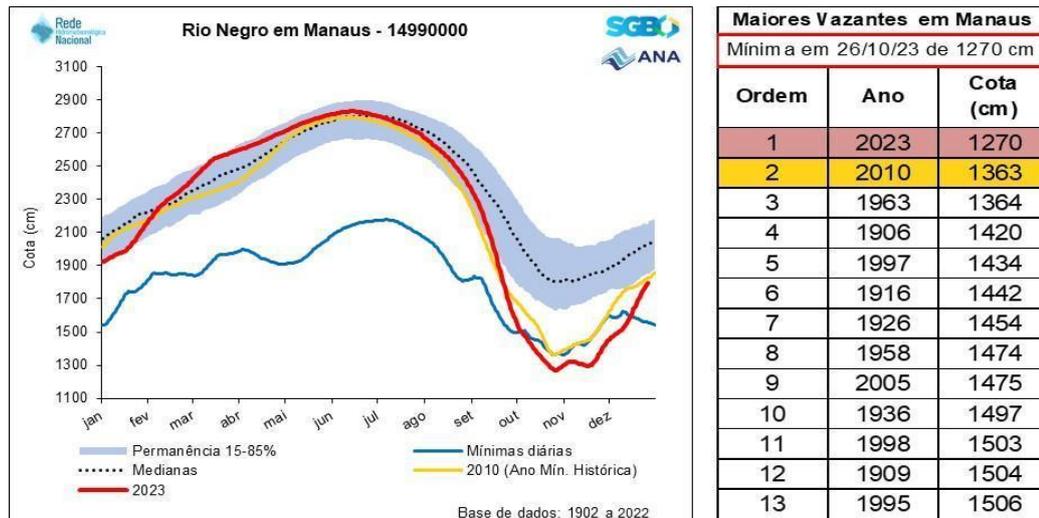


Figura 10: Cotagrama da Estação de Manaus com a evolução da vazante de 2023, quadro resumo com as maiores vazantes deste posto hidrológico. Fonte: SGB (2023).



Figura 11: Porto de Manaus na ocasião da maior cheia de 2021 e maior vazante em 2023. Fonte: Autores (2023).

O rio Madeira também sofreu uma estiagem severa em Porto Velho e Humaitá os menores níveis já registrados ocorreram no mês de outubro nestas estações de monitoramento; em 08/10 atingindo a cota mínima de 1,10 m em Porto Velho e 13/10 registrando o menor nível de 8,10 m em Humaitá [7].

Na estação de Careiro da Várzea, a cota mínima de 30 cm foi registrada em 24/10/23, superando a de 25/10/2010 que havia sido de 125 cm. Em Itacoatiara, o Amazonas registrou o nível mínimo de 36 cm em 26/10/23, a maior vazante já registrada no posto, superando a de 24/10/2010 em 55 cm. Em Parintins, os níveis registrados ficaram negativos, foi registrada a cota mínima de -217 cm em 25/10/23, a maior vazante da série histórica. Em Óbidos, o rio Amazonas atingiu a cota de -96 cm 09/11/2023, o menor nível já registrado em Almeirim, atingiu em 18/11/2023 a cota de 143 cm, apontando 2023 como a maior vazante desta calha [7].

O Quadro 1 destaca os níveis mínimos históricos atingidos em 2023, onde grande parte das estações monitoradas do rio Amazonas acompanhou o processo de descida acentuada das regiões a montante, por exemplo Careiro da Várzea, Itacoatiara e Parintins registraram as mínimas históricas em 2023, da mesma forma as estações de Óbidos e Almeirim que apresentaram as cotas mínimas neste ano e em Santarém que registrou a 8ª maior vazante com o nível de 14 cm [7].

Quadro 1: Cotas mínimas históricas anteriores e atingidas em 2023.

Estações	2023			Ano da mínima anterior	Nível máximo em 2023
	Data da Mínima	Cota mínima (cm)	Relação com a cota mínima anterior (cm)		
Beruri (Purus)	23/10/23	401	117	2010 (518)	2065
Porto Velho (Madeira)	08/10/23	110	30	2022 (140)	1575
Humaitá (Madeira)	13/10/23	810	23	1969 (833)	2308
Manacapuru (Solimões)	26/10/23	311	81	2010 (392)	1920
Manaus (Negro)	26/10/23	1270	93	2010 (1363)	2830
Careiro (P. Careiro)	24/10/23	30	95	2010 (125)	1601
Itacoatiara (Amazonas)	26/10/23	36	55	2010 (91)	1377
Parintins (Amazonas)	25/10/23	-217	31	2010 (-186)	830
Óbidos (Amazonas)	09/11/2023	-96	-52	1997 (-44)	769
Almeirim (Amazonas)	18/11/2023	143	81	2015 (224)	659

Fonte: Dados do Boletim de Monitoramento do SGB (2023), organizado pelos Autores.

5. Previsões realizadas no período da vazante.

Durante o evento da vazante, o Serviço Geológico do Brasil incluiu no Boletim de Monitoramento, a apresentação de previsões utilizando o Modelo Cota-cota, utilizando a previsão de precipitação por ensemble a partir do modelo GEFS.

Além do modelo de previsão cota-cota, utilizou-se também o modelo hidrológico *Soil Moisture Accounting Procedure* - SMAP, calibrado utilizando-se algoritmo genético MOPSO [9] na previsão de níveis com horizonte de até 15 dias. Para essa previsão, são utilizados, além dos dados hidrológicos de níveis e vazões, os dados de evapotranspiração *Operational Simplified Surface Energy Balance* - SSEBOP [10], estimativas de chuvas utilizando-se o produto MERGE/INPE [11] e previsão de chuvas por Ensemble com modelo meteorológico *Global Forecast System* - GEFS [12]. Importante lembrar que o modelo de previsão GEFS não fornece apenas uma única saída de previsão de chuvas, mas um conjunto (ou Ensemble) de 20 previsões.

Neste sentido, destacam-se as previsões [7] de Tabatinga no rio Solimões (Figura 12) por ser região de cabeceira representa o que pode acontecer nos próximos dias na bacia do Solimões e demais rios que são influenciados por esta calha. Outra previsão [7] importante apresentada pelo SGB foi para o rio Negro em Manaus, exemplificada na Figura 13 para o mês de dezembro.

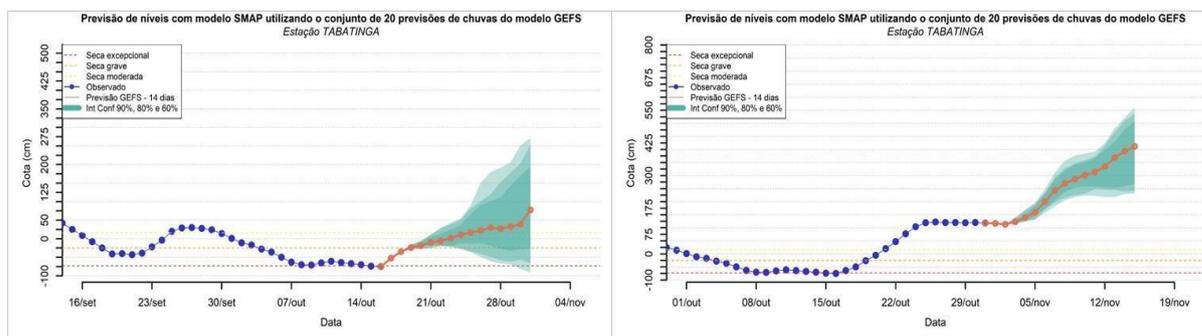


Figura 12: Previsões apresentadas para o Rio Solimões em Tabatinga em outubro e novembro de 2023. Fonte: Adaptado de SGB (2023).

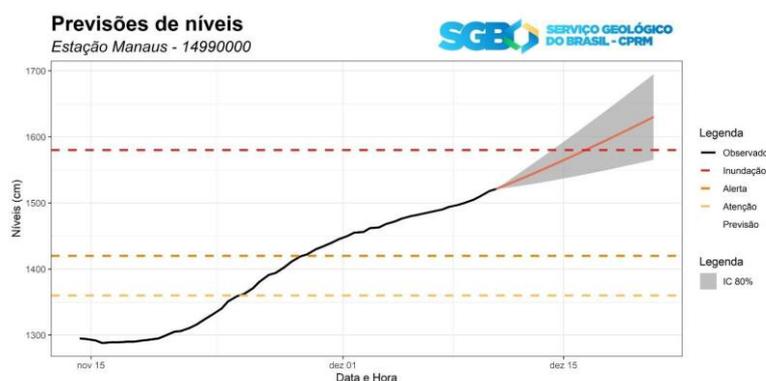


Figura 13: Previsão do nível do Negro para Manaus em dezembro de 2023. Fonte: Adaptado de SGB (2023).

6. Considerações Finais

A vazante de 2023 foi severa para todo Estado do Amazonas e ainda configurou um evento regional, uma vez que cidades de outros estados da região norte também foram impactadas e apresentaram níveis dos mais baixos já registrados. Considerando as informações climáticas, esse sistema foi afetado principalmente pela ausência de chuvas a partir do segundo semestre pelo efeito do El Niño, somado ainda às altas temperaturas motivadas por outro fenômeno que seria o aquecimento dos oceanos no Atlântico Norte. Na ocasião da estiagem de 2023, esses eventos ocorreram simultaneamente, algo ainda não registrado em outras secas hidrológicas.

Diante dos impactos gerados pela vazante severa para a região, sistemas de alerta, boletins semanais e modelos de previsão de níveis ou cotas de rios são importantes para o monitoramento e acompanhamento por parte dos tomadores de decisão e até mesmo para a população no sentido de se preparar para as dificuldades relacionadas aos eventos climáticos de seca, como o caso do abastecimento, transporte e serviços que nessa região estão interligados com os rios da bacia hidrográfica.

Referências

- [1] SILVA, J. S. CALMANT, S. SEYLER, F. Variabilidade espacial do nível d'água na bacia amazônica durante eventos extremos. In: **Secas na Amazônia: causas e consequências**. Oficina de Textos, 2013, p. 209-212.
- [2] MARENGO, J.A; TOMASELLA, J. ALVES, L. M; SOARES, W. R; RODRIGUES, D. A. The drought of 2010 in the contexto of historical droughts in the Amazon region. **Geophysical research letters**, v.38, n.12, 2011.
- [3] TIAN, K; WANG, Z; LI, F; GAO, Y; XIAO, Y; LIU, C. Drought events over the Amazon river basin (1992 – 2019) as detected by the climate-driven total water storage change. **Remote Sensing** 13 (6) p. 1124, 2021.
- [4] YU, Z; WANG, J; LIU, S; RENTCH, J. S; SUN, P; LU, C. Global gross primary productivity and water use efficiency changes under drought stress. **Environ. Res. Lett.**2017, 12, 014016.

[5] SCHÖNGART, J; JUNK, W. J. Clima e hidrologia nas várzeas da Amazônia Central. **Várzeas Amazônicas: Desafios para um Manejo Sustentável**, p. 44-65, 2020.

[6] CASEMIRO, P. Quatro rios da Bacia Amazônica chegam ao menor nível histórico em setembro de 2023. In: **Reportagem para o Globo.com G1 em Meio Ambiente**. Publicada em 7 de outubro de 2023. Disponível em www.g1.globo.com.

[7] SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – SGB. **59º BOLETIM DE ALERTA HIDROLÓGICO DA BACIA DO AMAZONAS**. Sistema de Alerta Hidrológico – SAH Amazonas. Dezembro de 2023. Disponível em <https://www.sgb.gov.br/sace/amazonas/>

[8] SENNA, R. C.; CARVALHO, L. R. R.; DALLAROSA, R. L. G. **Boletim de Monitoramento Climático de Grandes Bacias**, Volume 3, Número 41. Repositório Inpa. 2023. Disponível em <https://repositorio.inpa.gov.br/>

[9] NASCIMENTO, L. S. V. D., REIS JÚNIOR, D. S., & MARTINS, E. S. P. R. (2009). Avaliação do algoritmo evolutivo MOPSO na calibração multiobjetivo do modelo SMAP no estado do Ceará. Disponível em repositorio.ufc.br.

[10] SENAY, G. B.; BUDDE, M.; VERDIN, J. P.; MELESSE, A. M. A coupled remote sensing and simplified surface energy balance approach to estimate actual evapotranspiration from irrigated fields. **Sensors**, v. 7, n. 6, p. 979-1000, 2007. <https://doi.org/10.3390/s7060979>.

[11] ROZANTE, J. R.; MOREIRA, D. S.; GONÇALVES, L. G. G. de; VILA, D. A. Combining TRMM and surface observations of precipitation: technique and validation over South America. **Weather Forecast**, v. 25, n. 3, 2010.

[12] ZHU, Y.; ZHOU, X.; LI, W.; HOU, D.; MELHAUSER, C.; SINSKY, E.; PEÑA, M.; FU, B.; GUAN, H.; KOLCZYNSKI, W.; WOBUS, R.; TALLAPRAGADA, V. Toward the improvement of subseasonal prediction in the National Centers for Environmental Prediction Global Ensemble Forecast System. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 123, n. 13, p. 6732-6745, 2018. <https://doi.org/10.1029/2018JD028506>.

Créditos Imagens

Imagem da capa: Foto de Casey Horner na Unsplash
Imagem Capa Arquitetura: Foto de Ricardo Gomez Angel na Unsplash
Imagem Capa Engenharia: Foto de Ricardo Gomez Angel na Unsplash
Imagem Capa Design 1: Foto de Goutham Krishna na Unsplash
Imagem Capa Design 2: Foto de Tabitha Turner na Unsplash

ISBN: 978-65-01-11164-3

CDL



9 786501 111643