

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA DA UFRJ

**DESENVOLVIMENTO, CARACTERIZAÇÃO
EXPERIMENTAL E DESEMPENHO
TERMOENERGÉTICO DE BIOCONCRETO CONTENDO
RESÍDUO DE MADEIRA.**

FABRÍCIO PIMENTEL GASPAR DA SILVA

DISSERTAÇÃO PARA EXAME DE DEFESA
Orientador: Prof. Dr. Thiago Melo Graboís
Orientadora: Profa. Dra. Reila Vargas Velasco

Linha de Pesquisa: Arquitetura, Projeto e Sustentabilidade

RIO DE JANEIRO
MAIO/2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROARQ – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura

**DESENVOLVIMENTO, CARACTERIZAÇÃO
EXPERIMENTAL E DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO
DE BIOCONCRETO CONTENDO RESÍDUO DE MADEIRA.**

Defesa de dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências em Arquitetura, Linha de pesquisa: Arquitetura, Projeto e Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Melo Graboís

Orientadora: Prof^a. Dra. Reila Vargas Velasco

Rio de Janeiro
Maio, 2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROARQ – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura

CIP - Catalogação na Publicação

P586d Pimental Gaspar da Silva, Fabrício
Desenvolvimento, caracterização experimental e
desempenho termoenergético de bioconcreto contendo
resíduo de madeira. / Fabrício Pimental Gaspar da
Silva. -- Rio de Janeiro, 2025.
180 f.

Orientador: Thiago Melo Graboís.
Coorientador: Reila Vargas Velasco.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do
Rio de Janeiro, Faculdade de Arquitetura e
Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura,
2025.

1. Engenharia dos materiais . 2. Desempenho
termo-energético . 3. Painéis de vedação vertical.
4. Biconcreto. 5. Serragem. I. Melo Graboís,
Thiago, orient. II. Vargas Velasco, Reila,
coorient. III. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROARQ – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura

**DESENVOLVIMENTO, CARACTERIZAÇÃO
EXPERIMENTAL E DESEMPENHO
TERMOENERGÉTICO DE BIOCONCRETO
CONTENDO RESÍDUO DE MADEIRA.**

Fabício Pimentel Gaspar da Silva

Defesa de Dissertação de Mestrado apresentado à banca do exame de defesa do Programa de Pós- Graduação em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Ciências em Arquitetura, linha de pesquisa Arquitetura, Projeto e Sustentabilidade.

Aprovada por:

Thiago Melo Grabois, D.Sc.
Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ

Reila Vargas Velasco, D.Sc.
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Beatriz Temtemples de Carvalho, D.Sc.
Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ

Sylvia Meimaridou Rola, D.Sc.
Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Guilherme Chagas Cordeiro, D.Sc.
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF

Rio de Janeiro
Maio, 2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROARQ – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura

Aos meus pais, que mesmo diante das dificuldades, me proporcionaram apoio e ensinamentos de que a educação não é apenas o melhor caminho, mas sim o único para a transformação.



AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, fonte de toda sabedoria e força, por me guiar e iluminar o caminho ao longo desta jornada, sem Sua orientação, esta realização não teria sido possível. Agradeço por me conceder a perseverança para superar os desafios, a clareza de pensamento para conduzir minha pesquisa e a saúde para perseverar durante todo o processo.

Aos meus pais, Andréa Pimentel e Fábio Pereira, que foram os pilares da minha jornada acadêmica e da minha vida como um todo. Esta conquista não teria sido possível sem o amor, o apoio e a orientação que vocês generosamente me proporcionaram ao longo dos anos. Vocês sempre acreditaram em mim, desde o início, e incentivaram meu desejo de buscar conhecimento e crescimento. Suas palavras de encorajamento nos momentos difíceis foram como uma luz que me guiou nos momentos de escuridão. Suas renúncias e sacrifícios para me proporcionar a melhor educação são apreciados além das palavras.

Às minhas amadas irmãs mais velhas, suas orientações, apoio e inspiração foram inestimáveis e moldaram quem me tornei. Cada uma de vocês, de maneira única, contribuiu para o meu sucesso. Vanessa Pimentel sempre foi a minha mentora e conselheira, Fabiana Pimentel sempre me incentivou a explorar novos horizontes, e Amanda Pimentel sempre me apoiou com palavras de ânimo e carinho. Suas próprias conquistas e jornadas me inspiraram a seguir meus sonhos e me tornaram uma pessoa melhor. Nas vezes em que enfrentei obstáculos, vocês estiveram lá para me encorajar e me ajudar a encontrar soluções.

Aos meus sobrinhos, Enzo Pimentel, Giovanna Pimentel e Melissa Pimentel que têm sido testemunhas do meu compromisso com a educação e do meu esforço para buscar conhecimento. Suas perguntas curiosas e o brilho em seus olhos sempre me lembraram da importância de ser um modelo para vocês, de continuar aprendendo e de perseguir os próprios sonhos. Espero que a minha jornada acadêmica tenha inspirado cada um de vocês a sonhar alto e a perseguir suas próprias paixões. Quero que saibam que, a cada sucesso que alcancei, parte desse sucesso é compartilhada com vocês.

À minha companheira Isabel Baldez, que esteve ao meu lado, nos momentos de desafio e triunfo, e sua presença constante tornou essa jornada mais significativa e gratificante.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROARQ – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura

Suas palavras de incentivo nos momentos de dúvida e sua fé em mim quando eu mesmo duvidei foram como um farol de luz durante as noites escuras. Sua paciência, compreensão e apoio inabalável me permitiram dedicar tempo e esforço ao meu estudo. Sei que, sem você, essa conquista não seria a mesma. Você é a minha rocha, meu confidente e minha maior incentivadora. Espero que esta conquista não seja apenas minha, mas nossa, pois ela é uma celebração do nosso compromisso mútuo, do nosso amor e da nossa capacidade de enfrentar desafios juntos.

Aos meus orientadores, Thiago Grabois e Reila Veslaco, que foram fundamentais para a minha jornada acadêmica desde a iniciação científica e o trabalho final de graduação. Sem a orientação, o apoio e a sabedoria que vocês generosamente compartilharam comigo ao longo desses anos, esta realização não teria sido possível. Para mim, vocês foram mais que mentores, foram amigos! Sob a sua orientação, aprendi não apenas os aspectos técnicos da minha área de estudo, mas também a importância da pesquisa, da inovação e do compromisso com a excelência acadêmica. Sei que o tempo e a dedicação que vocês investiram em minha formação foram inestimáveis. Hoje, esta conquista reflete não apenas o meu esforço, mas também a qualidade da orientação que recebi de vocês. Esta é uma vitória que compartilho com vocês de coração.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão aos professores do Laboratório de Ensino de Materiais de Construção e Estudo dos Solos (LEMC-FAU/UFRJ), em especial ao Prof. Dr. Marcos Silvos e à Profa. Dra. Luciana Figueiredo.

Ao Prof. Marcos, agradeço pela orientação cuidadosa, paciência e pelo compartilhamento de seu vasto conhecimento. Sua dedicação ao ensino e à pesquisa foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e para o meu crescimento como pesquisador(a).

À Profa. Luciana, sou imensamente grato(a) pelo apoio constante, pela atenção aos detalhes e pelos conselhos valiosos. Sua paixão pela pesquisa e sua generosidade em compartilhar saberes foram fontes de inspiração durante todo o processo.

Gostaria também de dedicar um agradecimento especial aos técnicos do laboratório, Paulo e Rayana, pelo suporte indispensável ao desenvolvimento deste trabalho. Seu



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROARQ – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura

profissionalismo, prontidão e dedicação contribuíram diretamente para o sucesso das atividades realizadas.

Não poderia deixar de fazer um agradecimento especial ao técnico Flávio, cuja alegria e entusiasmo contagiaram o ambiente de trabalho. Seu esforço incansável para ajudar, combinado com as conversas leves e divertidas sobre animes, trouxe não apenas eficiência, mas também leveza e descontração aos momentos mais desafiadores.

Um agradecimento especial à Dona Helena, pelo café sempre preparado com carinho, que aquecia não apenas os dias de trabalho, mas também o coração, e pelas conversas descontraídas, que ajudaram a aliviar a mente nos momentos de maior pressão.

Estendo meu agradecimento a todos os integrantes do LEMC, que, de diferentes maneiras, contribuíram para a realização deste trabalho. O ambiente colaborativo e acolhedor do laboratório foi essencial para transformar os desafios em aprendizado e motivação.

Estendo minha gratidão ao grupo de pesquisa GEPARQ – Gestão de Projetos em Arquitetura, por seu suporte intelectual e pelas trocas de ideias que enriqueceram este trabalho. Aos colegas pesquisadores Guilherme, Ana, Conrado, Nicole, Stefani, César, Bárbara e todos os demais integrantes do grupo, agradeço pelas contribuições, pelos diálogos produtivos e pelo ambiente colaborativo. Cada interação, seja técnica ou descontraída, foi essencial para tornar esta jornada acadêmica mais rica e significativa.

Gostaria também de fazer um agradecimento especial à Cinthya, Julia e Joanna, pela valiosa ajuda com o software de simulação, bem como pelas pesquisas relacionadas à eficiência energética e materiais, que foram fundamentais para o enriquecimento deste trabalho. A dedicação e o comprometimento de vocês foram determinantes para os avanços alcançados e para a qualidade final deste projeto.

Gostaria de agradecer de forma especial à Taiane Pilar, que me acompanhou desde a Iniciação Científica e tem sido uma fonte constante de apoio e inspiração. Admirável não apenas pela sua competência em estudos e pesquisas, mas também pelos seus ensinamentos sobre conforto ambiental e eficiência energética. Taiane é um exemplo para mim na vida acadêmica, e sou muito grato por todo o apoio e conhecimento compartilhado.



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROARQ – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura

Aos meus amigos que testemunharam os momentos desafiadores que enfrentei durante as etapas finais desta pesquisa e compreenderam as muitas vezes em que precisei me ausentar. Aos meus colegas de turma, com destaque para os amigos Eduarda Alberto, Patrícia Freitas e Viscente Fasciotti por compartilhar conhecimentos e parceria. A equipe técnica e os excelentes professores do PROARQ, que gentilmente contribuíram para esclarecer inúmeras dúvidas e questões que surgiram ao longo do processo.

Aos meus amigos, que fiz durante a graduação e que continuaram ao meu lado após esse período, agradeço de coração: Lidiane Marins, Eduardo Saavedra, Cecílio Mattos, Ana Beatriz Kempf, João Inácio, Isabela Lomba, Lucas Gusmão, Isabel Costa e Hugo Makita. As amizades que construí com vocês foram essenciais não apenas para minha formação acadêmica, mas também para os momentos de alegria, apoio e descontração. Agradeço por cada conversa, por cada risada e por estarem presentes em minha trajetória.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão aos meus amigos Gabriel e Giulia, que tive a honra de conhecer ao longo da minha trajetória profissional. Suas amizades, apoio e conselhos foram essenciais para o meu crescimento pessoal e acadêmico durante o desenvolvimento deste trabalho. A troca de ideias, o incentivo constante e a presença nos momentos desafiadores me impulsionaram a seguir em frente com determinação.

Agradeço de coração por cada conversa, risada e gesto de compreensão, que tornaram essa jornada mais leve e gratificante. Sou muito grato por tê-los ao meu lado, não apenas como colegas, mas como verdadeiros amigos.

Gostaria de fazer um agradecimento especial também aos meus amigos online de Valorant: Arthur (Mustaf), Alan (Em treinamento), Fábio (Black War), Edinaldo (Eddygamer), Rafael (Antifa) e Leonardo (Leleo). As partidas com vocês foram momentos de descontração e diversão que ajudaram a aliviar o peso dos dias mais intensos. Agradeço pela parceria, pelas risadas e pelo companheirismo mesmo à distância.

Por fim, não posso deixar de agradecer à banca examinadora, composta pelos Professores Dr. Sylvia Rola, Prof. Dr. Beatriz Temtemples e Prof. Dr. Guilherme Cordeiro, que aceitaram o convite para contribuir com suas valiosas observações e sugestões,



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROARQ – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura

enriquecendo significativamente este trabalho. A generosidade e o tempo dedicado por cada um de vocês foram fundamentais para a qualidade e o sucesso desta dissertação.

Este trabalho recebeu o apoio essencial da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por meio do Programa de Excelência Acadêmica (Proex). Agradeço também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), cuja contribuição foi fundamental no início do interesse por esta pesquisa, durante a Iniciação Científica, oferecendo o suporte necessário para o desenvolvimento deste projeto. A colaboração dessas instituições foi decisiva para a realização desta dissertação.



RESUMO

DESENVOLVIMENTO, CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL E DESEMPENHO TERMOENERGÉTICO DE BIOCONCRETO CONTENDO RESÍDUO DE MADEIRA.

Fabrício Pimentel Gaspar da Silva

Orientador: Prof. Dr. Thiago Melo Grabois
Orientadora: Profa. Dra. Reila Vargas Velasco

Resumo da Defesa da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências em Arquitetura.

O crescente impacto ambiental da construção civil e a necessidade de melhorar a eficiência energética motivaram a pesquisa sobre bioconcretos, que incorporam resíduos orgânicos, como a serragem. Este estudo avalia como diferentes frações de serragem afetam as propriedades mecânicas e térmicas do bioconcreto, com foco em elementos de vedação vertical com bom desempenho térmico e baixo impacto ambiental. O processo envolveu cinco etapas: caracterização dos materiais, moldagem dos testes, avaliação das propriedades mecânicas e físicas (resistência à compressão, absorção, massa específica e índice de vazios), produção de painéis com diferentes frações de serragem (35% a 55%), e análise térmica através de uma câmara térmica, com sensores para medir a condutividade térmica sob diversas temperaturas. A última etapa consistiu na validação analítica dos dados obtidos nos ensaios térmicos a partir de simulações computacionais. Os resultados indicaram que a adição de serragem reduziu a resistência à compressão, especialmente em maiores quantidades. A mistura com 15% de serragem apresentou a maior resistência, alcançando 33 MPa após 3 dias de cura, enquanto a mistura com 45% teve resistência significativamente inferior. Contudo, as misturas com maior teor de serragem recuperaram gradualmente a resistência com o tempo. Além disso, a absorção de água e o índice de vazios aumentaram, o que indicou maior porosidade e capacidade de retenção de água. Em termos térmicos, as misturas com maior quantidade de serragem apresentaram melhores índices de isolamento, favorecendo o controle térmico.

As simulações computacionais, alimentadas pelos dados experimentais, mostraram diferenças em relação aos valores de condutividade térmica presentes na literatura, validando o uso da câmara térmica como método empírico e confirmando o potencial do bioconcreto com serragem na redução da carga térmica das edificações.

Palavras-chave: engenharia dos materiais – desempenho termo-energético – painéis de vedação vertical – bioconcreto - serragem

Rio de Janeiro
Maio, 2025



ABSTRACT

DEVELOPMENT, EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION, AND THERMOENERGETIC PERFORMANCE OF BIOCONCRETE CONTAINING WOOD WASTE.

Fabício Pimentel Gaspar da Silva

Advisor: Prof. Dr. Thiago Melo Graboio

Advisor: Profa. Dra. Reila Vargas Velasco

Abstract of the Defense of the Masteral Dissertation submitted to the Graduate Program in Architecture, Faculty of Architecture and Urbanism, Federal University of Rio de Janeiro - UFRJ, as part of the necessary requirements to obtain the title of Master's of Science in Architecture.

The growing environmental impact of the construction industry and the need to improve energy efficiency have driven research into bioconcretes, which incorporate organic waste, such as sawdust. This study evaluates how different fractions of sawdust affect the mechanical and thermal properties of bioconcrete, focusing on vertical sealing elements with good thermal performance and low environmental impact. The process involved five stages: material characterization, mold preparation, evaluation of mechanical and physical properties (compression strength, absorption, specific mass, and void index), production of panels with different sawdust fractions (35% a 55%), and thermal analysis through a thermal chamber, with sensors to measure thermal conductivity at various temperatures. The final stage consisted of analytical validation of the data obtained from the thermal tests using computational simulations. The results indicated that the addition of sawdust reduced the compressive strength, especially at higher quantities. The mixture with 15% sawdust exhibited the highest strength, reaching 33 MPa after 3 days of curing, while the mixture with 45% showed significantly lower strength. However, the mixtures with higher sawdust content gradually regained strength over time. Additionally, water absorption and the void index increased, indicating higher porosity and water retention capacity. Thermally, the mixtures with more sawdust showed better insulation properties, favoring thermal control. The computational simulations, based on the experimental data, showed differences compared to the thermal conductivity values found in the literature, validating the use of the thermal chamber as an empirical method and confirming the potential of sawdust-based bioconcrete in reducing the thermal load of buildings.

Keywords: materials engineering - thermo-energetic performance - vertical sealing panels – bioconcrete - sawdust



LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Relação entre produto interno bruto (PIB) e geração de resíduos entre 2010 e 2020	38
Figura 2 – Geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) por região.....	39
Figura 3 – Projeção de geração de resíduos sólidos urbanos global até 2050.....	39
Figura 4 – Média global da composição de resíduos e solos urbanos.....	40
Figura 5 – Projeção global de destino de resíduos sólidos urbanos entre 2020 e 2050..	41
Figura 6 – Geração de RSU no Brasil em 2023	43
Figura 7 – Geração de RSU no Brasil em 2023 por região	44
Figura 8 – Geração de RSU per capita no Brasil em 2022/2023 por região	45
Figura 9: Emissões de CO ₂ no mundo de 1960 a 2022.....	87
Figura 10: Anomalia anual da temperatura global: 1850 - 2023.....	88
Figura 11: Total de emissões de CO ₂ antrópicas associadas à matriz energética brasileira	89
Figura 12 – a) Fração < 1,18 mm b) Fração > 1,18 mm.....	103
Figura 13 – Coloração da água após a primeira lavagem.....	103
Figura 14 – Variação da coloração da água após as 8 lavagens	104
Figura 15 – Serragem de madeira utilizada	104
Figura 16 – a) Material em água por 24h b) Secagem ao ar livre c) Serragem após sua inserção no tronco cônico d) Aplicação de 25 golpes e) Material saturado superficialmente úmido f) Material saturado superficialmente seco g) Pesagem do material com 100 g de amostra no frasco de 500 ml h) Serragem após secagem na estufa de 105°C.....	105
Figura 17 – a) Material em água por 24h b) Material saturado superficialmente seco c) Pesagem da amostra d) Material submerso em água e) Material após secagem na estufa de 105°C	106
Figura 18 – Betoneira de 150L e 400L utilizada para a preparação dos bioconcretos .	109
Figura 19 – Fôrma produzida para a fabricação dos bioconcretos	111
Figura 20 – Equipamento que será utilizado para o ensaio de resistência a compressão	112



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROARQ – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura

Figura 21 – (a) Carrinho para suporte dos Painéis; (b) Câmara; (c) Módulo de Aquecimento.....	113
Figura 22 – Módulo de aquecimento	114
Figura 23 – Setores da Câmara Térmica: Módulo de Aquecimento e Pannel Divisor .	114
Figura 24 – Setores da Câmara Térmica: Módulo de Aquecimento e Pannel Divisor .	115
Figura 25 – (a) Lynx; (b) Câmera Termográfica	115
Figura 26 – Planta do objeto de estudo a ser analisado	117
Figura 27 – Zonas térmicas da unidade habitacional analisada.....	119
Figura 28 – Objeto de análise após modelagem	119
Figura 29 - Curva granulométrica do cimento.....	124
Figura 30 - Serragem separada	125
Figura 31 - Curva granulométrica da serragem de madeira	125
Figura 32 - Curva compatibilidade superplastificante e cimento	127
Figura 33 – Evolução da resistência à compressão dos bioconcretos produzidos (barra de erro apresenta o desvio padrão)	128
Figura 34 - Localização dos Sensores	133
Figura 35 - Temperaturas aferidas durante as 10 horas de ensaio para o pannel BCS35	134
Figura 36 - Temperaturas aferidas durante as 10 horas de ensaio para o pannel BCS45	136
Figura 37 - Temperaturas aferidas durante as 10 horas de ensaio para o pannel BCS55	137
Figura 38 - Comparação entre as temperaturas do Ambiente 1 e Ambiente 2 em BCS35, BCS45 e BCS55, respectivamente	139
Figura 39 - Fotos termográficas da face 1 para BCS35, BCS45 e BCS55.....	142
Figura 40 - Curva do ambiente 1 e curvas médias das faces 1 e 2 das misturas BCS35, BCS45 e BCS55, respectivamente	145
Figura 41 - Gráfico comparativo dos modelos referente ao PHFT (%)	150
Figura 42 - Gráfico comparativo dos modelos referente ao TOMáx (°C)	151
Figura 43 - Gráfico comparativo dos modelos referente a CgTT (Kw/ano)	152



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROARQ – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura

Figura 44 - Gráfico comparativo dos modelos referente ao PHFT (%)	157
Figura 45 - Gráfico comparativo dos modelos referente ao TOM _{áx} (°C)	159
Figura 46 - Gráfico comparativo dos modelos referente a CgTT (Kw/ano)	161



LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Compilado de estudos e pesquisas com a utilização de serragem de madeira em matriz cimentícia	61
Tabela 2 – Dosagem dos bioconcretos em kg/m ³	108
Tabela 3 – Características de Projeto da Edificação em Estudo.....	117
Tabela 4 – Padrão de Ocupação para dias de semana e final de semana	120
Tabela 5 – Padrões de uso do sistema de iluminação artificial dos APP	121
Tabela 6 – Propriedades dos Materiais nas Simulações	123
Tabela 7 – Propriedades físicas da serragem.....	125
Tabela 8 - Resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone	130
Tabela 9 - Valores médios de massa específica, absorção e índice de vazios dos bioconcretos produzidos	131
Tabela 10 - Temperaturas máximas e temperaturas finais determinadas no ensaio com a câmara térmica para as amostras BCS35, BCS45 e BCS55 (todos os sensores)	138
Tabela 11 - Amortecimento e Atraso Térmico para BCS35, BCS45 E BCS55.....	141
Tabela 12 - Comparação da Temperatura central na face P1 para	144
Tabela 13 – Síntese dos resultados obtidos de PHFT, Tomax e CgTT para o modelo referência e para os modelos com os painéis BCS35, BCS45 e BCS55	147
Tabela 14 – Propriedades termofísicas calculadas a partir dos resultados obtidos e utilizadas nas novas simulações	154
Tabela 15 – Propriedades termofísicas calculadas a partir dos resultados obtidos e utilizadas nas novas simulações	154
Tabela 16 – Resultados do modelo referência comparado ao real com os painéis BCS35, BCS45 e BCS55	154



LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Água de compensação	109
Equação 2 - Percentual de horas ocupadas em uma faixa de temperatura operativa (PHFT)	118



LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

α - Absortância

ε - Emissividade

λ - Condutividade térmica

ρ - Densidade de Massa Aparente

ϕ - Atraso térmico

μ - Amortecimento térmico

c - Calor específico

CT - Capacidade térmica

e - Espessura

R - Resistência térmica

U - Transmitância térmica

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

APP - Ambiente de Permanência Prolongada

AQUA-HQE - Alta Qualidade Ambiental

BEN - Balanço Energético Nacional

BREEAM - Building Research Establishment Environmental Assessment Method

BCS15, BCS25, BCS35, BCS45, BCS55 – Nomenclatura para as misturas produzidas e seus teores de fração volumétrica de serragem

CaCl₂ - Cloreto de cálcio



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROARQ – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura

CgTT – Carga térmica total

CONAMA - Comissão Nacional do Meio Ambiente

ENCE - Etiqueta Nacional de Conservação de Energia

ENEC - Etiqueta Nacional de Conservação de Energia

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

EPS - Poliestireno Expandido

GEE - Gases do efeito estufa

HIS – Habitação de interesse social

HQE™ - Haute Qualité Environnementale

INI-R - Instrução Normativa do Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

LABEEE - Laboratório de Eficiência Energética em Edificações

LEED - Leadership in Energy and Environmental Design - Certificação internacional para edifícios sustentáveis

MEV - Microscopia eletrônica de varredura

MME - Ministério das Minas e Energia

MPa - Megapascal

NBR - Norma Brasileira

PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

PHFT - Percentual de Horas de Ocupação em uma Faixa de Temperatura Operativa



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROARQ – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura

RSU - Resíduo sólido urbano

RCC - Resíduo da construção civil

RTQ-C - Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicos

RTQ-R - Regulamento Técnico de Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais

SCA - Selo Casa Azul

Tomáx - Temperatura Operativa Anual Máxima

TRY - Typical Reference Year

UH - Unidade Habitacional

ZB - Zona Bioclimática



SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	32
1.1. Contexto e Motivação.....	32
1.2. Objetivo.....	Erro! Indicador não definido.
1.3. Organização da Pesquisa.....	Erro! Indicador não definido.
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	37
2.1. Os resíduos de materiais de construção e seus impactos	37
2.1.1. Panorama Geral.....	37
2.1.2. Geração de Resíduos no Brasil.....	42
2.1.3. Resíduos da Construção Civil (RCC)	45
2.1.4. Resíduos de Madeira na Construção Civil.....	48
2.1.5. Conclusão.....	51
2.2. Os bioconcretos e sua utilização a partir do resíduo de madeira.....	53
2.2.1. O uso da Madeira na Construção Civil.....	53
2.2.2. Introdução ao Bioconcreto e a incorporação de resíduos de madeira.....	56
2.2.3. Propriedades Físicas do Bioconcreto com Resíduo de Madeira.....	73
2.2.4. Propriedades Mecânicas do Bioconcreto com Resíduo de Madeira	75
2.2.5. Propriedades Térmicas e Isolamento	77
2.2.6. Compatibilidade e Interação Entre a Madeira e a Matriz de Concreto	78
2.2.7. Impactos ambientais e as potencialidades do bioconcreto no mercado da construção civil	79
2.2.8. Desafios e Perspectivas Futuras	83
2.2.9. Conclusão.....	85
2.3. Desempenho térmico das edificações.....	86
2.3.1. Contextualização do Desafio do Aquecimento Global e das Mudanças Climáticas	86



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROARQ – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura

2.3.2.	Regulamentação e Normas.....	90
2.3.3.	Materiais x Conforto Térmico	94
2.3.4.	Exemplos.....	96
2.3.5.	Desafios Locais e Soluções Adaptáveis.....	98
2.3.6.	Conclusão.....	99
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	101
3.1.	Seleção, beneficiamento e caracterização dos materiais.....	101
3.1.1.	Cimento Portland.....	101
3.1.2.	Serragem de Madeira.....	102
3.1.2.1.	Origem e obtenção da serragem	102
3.1.2.2.	Tratamento da serragem.....	103
3.1.2.3.	Caracterização física da serragem.....	104
3.1.3.	Água	106
3.1.4.	Agente modificador de viscosidade	106
3.1.5.	Aditivos químicos	107
3.1.5.1.	Superplastificante	107
3.1.5.2.	Cloreto de cálcio (CaCl ₂)	107
3.2.	Dosagem das misturas	107
3.2.1.	Determinação da água de compensação.....	108
3.2.2.	Moldagem	109
3.4.	Propriedades Mecânicas	112
3.5.	Propriedades Físicas.....	112
3.5.1.	Estado Fresco	112
3.5.2.	Estado Endurecido	112
3.6.	Propriedades Térmicas.....	113



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROARQ – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura

3.7.	Simulação Computacional	116
3.7.1.	Tipologia Habitacional Analisada	116
3.7.2.	Métodos da simulação e da modelagem.....	117
3.7.3.	Parâmetros da simulação	119
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	124
4.1.	Caracterização dos materiais	124
4.1.1.	Cimento Portland.....	124
4.1.2.	Serragem de madeira	124
4.1.3.	Superplastificante	126
4.2.	Propriedades dos Bioconcretos.....	127
4.2.1.	Propriedades Mecânicas.....	127
4.2.2.	Propriedades Físicas	130
4.2.2.1.	Estado Fresco.....	130
4.2.2.2.	Estado Endurecido.....	131
4.2.3.	Propriedades Térmicas.....	132
4.2.3.1.	Fluxo Térmico	133
4.2.3.2.	Condutividade Térmica	144
4.3.	Simulações termoenergéticas	147
4.3.1.	Etapa 1	147
4.3.2.	Etapa 2	153
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	164
5.1.	Limitações da dissertação	Erro! Indicador não definido.
5.2.	Recomendações para trabalhos futuros.....	167
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	171

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contexto e Motivação

Nos últimos 40 anos, a quantidade de resíduos sólidos tem aumentado de forma expressiva em razão do crescimento desenfreado das cidades e da população urbana mundial. Estimativas apontam que, até 2100, cerca de 10,2 bilhões de pessoas habitarão em cidades (DESA, 2024). Esse aumento na geração de resíduos está diretamente relacionado ao consumo exacerbado, caracterizado pela produção excessiva e descontrolada de bens, o que pode afetar significativamente o meio ambiente.

A construção civil, como um dos setores mais impactantes nesse cenário, é responsável por grande parte dos resíduos sólidos gerados, além de ser uma das atividades que mais consomem recursos naturais e energia (Oliveira *et al.*, 2023).

Além disso, quando não são gerenciados de forma adequada, esses resíduos podem causar impactos ambientais significativos, como a contaminação do solo e da água, além de contribuir para o aumento do volume de lixo nos aterros sanitários. Entre os diferentes tipos de resíduos, destacam-se os resíduos de madeira, que, quando incorporados aos concretos, surgem como uma alternativa promissora, alinhada aos princípios da economia circular e da sustentabilidade ambiental. Isso ocorre porque a madeira é um recurso renovável, e sua utilização em materiais de construção pode melhorar características importantes, como as propriedades térmicas, especialmente nos sistemas de vedação das edificações (Guimarães *et al.*, 2024). O emprego desses resíduos de madeira nos bioconcretos pode ainda reduzir o volume de resíduos encaminhados para os depósitos de lixo, aumentando, mitigando os impactos ambientais associados ao descarte inadequado. No entanto para que essa alternativa seja viável do ponto de vista técnico assim como financeiro é preciso entender as características físicas, mecânicas e térmicas desses materiais bem como avaliar sua eficiência em situações práticas. Logo, a caracterização experimental desses materiais é, portanto, uma etapa fundamental para garantir sua viabilidade técnica e funcional.

Em consequência ao exposto anteriormente, alguns termos, surgiram de forma a alertar a população e gerar reflexões sobre o aumento do consumo energético, como o denominado “Dia da Sobrecarga da Terra”, cujo dia é marcado pelo momento em que a humanidade consome mais recursos naturais do que o planeta é capaz de regenerar em um ano. Este dia tem sido cada vez mais antecipado, o que mostra que estamos consumindo mais

recursos naturais do que a Terra é capaz de produzir. Essa é uma preocupação urgente, pois a sobrecarga de recursos naturais pode levar a uma crise ambiental e afetar negativamente a qualidade de vida das pessoas.

No contexto das edificações, normas, leis e regulamentos foram estabelecidas com o objetivo de regulamentar o desempenho térmico e energético, tais como o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) em 1985, coordenado pelo Ministério de Minas e Energia (MME), a Lei Nº 10.295, de 17 de outubro de 2001 (Lamberts; Dutra; Pereira, 2014), a NBR 15220 (ABNT, 2022), o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicos – RTQ-C (BRASIL, 2010), o Regulamento Técnico de Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais – RTQ-R (BRASIL, 2012) e a NBR 15575 (ABNT, 2021). Recentemente a Portaria nº 248/2018 criou a Instrução Normativa do Inmetro para Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais, de Serviços e Públicas (INI-R, 2022), que tem como propósito melhorar o método utilizado pela RTQ-R.

Entre o alerta sobre o "Dia da Sobrecarga da Terra" e a enumeração de normas de eficiência energética, é fundamental questionar: a arquitetura sustentável convencional está realmente contribuindo para reverter a crise ambiental ou apenas maquiando práticas insustentáveis? Autores como, Saramago (2022) questionam se a arquitetura sustentável de fato contribui para a minimização do impacto ambiental uma vez que, desde sua difusão nos anos 1980, a noção de sustentabilidade tem sido aplicada indiscriminadamente para justificar práticas arquitetônicas que, na realidade, perpetuam um sistema insustentável de produção. O setor da construção civil continua sendo cúmplice do capitalismo extrativista, dependente da exploração intensiva de recursos naturais e corpos humanos. Mesmo com o surgimento de certificações e normas de eficiência energética, a produção arquitetônica convencional não questiona as bases do sistema que gera a crise ambiental.

Com isso, o problema vai além da eficiência técnica: o próprio modo de produção capitalista, do qual a arquitetura contemporânea faz parte, é estruturalmente insustentável. As normas de desempenho energético, embora importantes, não enfrentam a raiz do problema - a lógica de exploração ilimitada de recursos que caracteriza nosso sistema econômico (Saramago, 2022). Portanto, entre o alerta sobre o esgotamento dos recursos e as normas técnicas, a arquitetura e a construção civil, em vez de apenas buscar edifícios mais eficientes dentro do mesmo sistema insustentável, precisam repensar radicalmente

o seu papel na relação entre sociedade e natureza. A verdadeira sustentabilidade exige não apenas cumprir regulamentos energéticos, mas transformar as bases materiais e ideológicas que orientam nossa prática profissional.

Assim, é necessário realizar estudos e pesquisas para desenvolver soluções inovadoras e sustentáveis, de forma que as questões energéticas se tornem premissas nas decisões projetuais ainda na concepção do projeto arquitetônico, já que o desempenho termo-energético é resultado da interação entre o usuário e o ambiente e um baixo desempenho térmico, pode surgir a partir de inadequações por parte da edificação às condições climáticas locais, podendo gerar aumentos no consumo de energia de forma a suprir o conforto nos ambientes internos a partir do uso de condicionamento artificial. Portanto, é preciso conhecer o desempenho de uma edificação para que se possa estimar o seu aporte energético e, conseqüentemente, os impactos ambientais (Almeida, 2019; Berleza, 2022; Peres, 2024).

Dentro desse contexto, a indústria da construção civil, responsável por uma parte significativa dos danos ambientais, precisa revisar seus métodos de produção e consumo. Este setor, embora desempenhe um papel fundamental na economia global, precisa adotar práticas mais sustentáveis, como o uso de materiais reciclados e a busca por maior eficiência energética. A implementação dessas práticas é essencial para reduzir os impactos ambientais e construir um futuro mais equilibrado. O desenvolvimento de bioconcretos, por exemplo, utilizando resíduos de madeira, surge como uma solução inovadora que não apenas contribui para a sustentabilidade, mas também abre novas possibilidades no setor da construção civil.

Diante desse cenário, a busca por soluções sustentáveis que minimizem os impactos ambientais e promovam a eficiência no uso de materiais torna-se cada vez mais urgente, uma vez que a relevância deste estudo está na contribuição para o desenvolvimento de materiais de construção mais ecológicos e eficientes que atendam às exigências atuais por práticas de construção que reduzam os impactos ambientais. Ao investigar as possibilidades dos resíduos de madeira na fabricação de bioconcretos, esta pesquisa procura não só oferecer uma solução técnica para melhorar o desempenho térmico das estruturas prediais, mas também promover a valorização de resíduos de baixo valor agregado. Sendo assim, espera-se que os resultados obtidos possam servir de base para estudos e aplicações futuras e contribuir para tornar a construção civil mais sustentável e resistente no futuro.

Por fim, é importante destacar que a viabilidade técnica e econômica dos bioconcretos desenvolvidos neste trabalho dependerá não apenas de suas propriedades físicas e térmicas, mas também de sua aceitação pelo mercado e da existência de políticas públicas que incentivem a utilização de materiais sustentáveis. A integração entre pesquisa científica, indústria e governo é, portanto, fundamental para a consolidação dessas soluções como alternativas viáveis e competitivas no mercado da construção civil. Este trabalho busca contribuir para essa integração, oferecendo dados e insights que possam embasar decisões técnicas e políticas, além de fomentar o debate sobre a importância da sustentabilidade na construção civil.

1.2. Objetivo

1.2.1. Objetivo Geral

O objetivo desta pesquisa é avaliar de forma experimental o desempenho termo-energético de painéis verticais produzidos com a incorporação de serragem em uma matriz cimentícia com diferentes frações volumétricas de serragem.

1.2.2. Objetivos Específicos

São objetivos específicos da presente pesquisa:

- Investigar a viabilidade da incorporação de serragem proveniente de madeira beneficiada, avaliando a sua influência e o seu impacto no comportamento físico, mecânico e térmico dos concretos, utilizando diferentes frações volumétricas de serragem nos bioconcretos.
- Analisar, por meio de simulações térmicas, o desempenho termo-energético de edificações. Esse estudo permitirá a análise de diferentes alternativas relacionadas às características construtivas das edificações, possibilitando identificar soluções que contribuam para melhorar seu desempenho de maneira eficiente e em um curto espaço de tempo.

1.3. Organização da Pesquisa

A presente pesquisa é dividida em 5 capítulos, dentre eles:

Capítulo 1: É composto de uma introdução ao tema, relatando sobre a problemática e importância do estudo, com os objetivos e a organização do trabalho;

Capítulo 2: O capítulo 2 possui a revisão bibliográfica sobre os principais temas que compõem o estudo: o desempenho térmico das edificações, a geração de resíduos a partir do consumo, os bioconcretos e suas contribuições para o conforto térmico interno e as principais características do material utilizado;

Capítulo 3: O terceiro capítulo possui a apresentação do programa experimental, bem como a caracterização dos materiais empregados e metodologias referentes à produção dos concretos, a avaliação das propriedades dos painéis desenvolvidos e a validação analítica;

Capítulo 4: O capítulo apresenta a análise, tratamento e discussões dos resultados acerca do programa experimental;

Capítulo 5: Por fim, o último capítulo é composto por conclusões do estudo e sugestões para os trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os fundamentos teóricos que embasaram as etapas de desenvolvimento desta pesquisa. Ele está dividido em três seções: a primeira aborda sobre a geração de resíduos na construção civil e como estes podem ser reutilizados de diversas formas para minimizar os impactos ambientais. A segunda seção expõe sobre a utilização de bioconcretos na construção civil a partir do uso de resíduos de madeira, exemplificando tipos e suas capacidades físicas, mecânicas, químicas e hidrotérmicas que podem desempenhar um papel significativo no desenvolvimento sustentável. A terceira e última seção apresenta uma visão geral sobre sustentabilidade e o desempenho térmico das edificações, com o surgimento da preocupação ambiental mundial e brasileira.

2.1. Os resíduos de materiais de construção e seus impactos

2.1.1. Panorama Geral

Além do lixo urbano comum e cotidiano gerados, as atividades humanas também resultam na produção de grandes quantidades de resíduos provenientes da agricultura, da construção e da demolição, da indústria, do comércio e da área da saúde. Todos os anos em todo o mundo são produzidas mais de 2 bilhões de toneladas de resíduo sólido urbano (RSU). Se esses resíduos fossem colocados em contêineres convencionais e alinhados um ao lado do outro eles dariam voltas ao redor da Terra 25 vezes ou cobririam o trajeto de ida e volta até à Lua (Global Waste Management, 2024).

A primeira Avaliação Global de Gerenciamento de Resíduos (GWMO), lançada em 2015, foi uma avaliação científica pioneira que destacou a situação do gerenciamento de resíduos e chamou a atenção da comunidade internacional para reconhecer sua importância no desenvolvimento sustentável e na mitigação das mudanças climáticas (Global Waste Management, 2024).

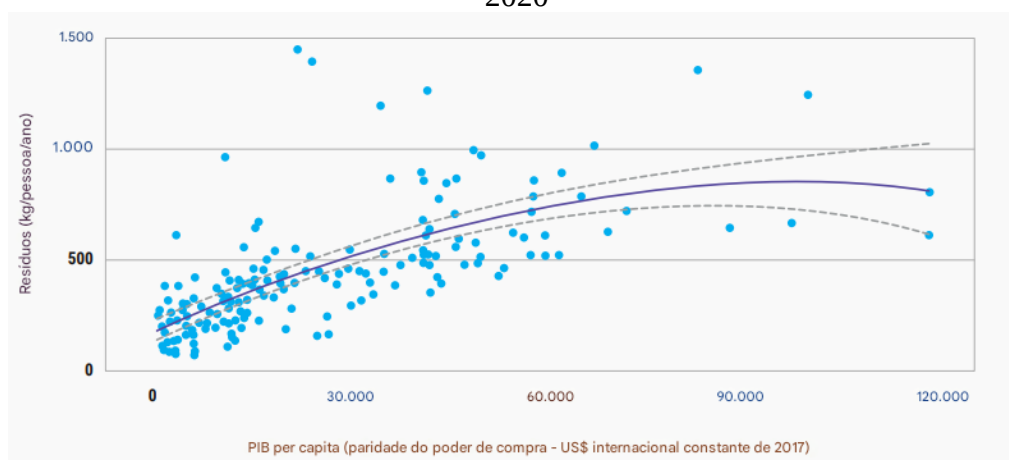
No entanto, apesar de alguns avanços, observa-se pouco progresso real, uma vez que a produção de lixo, a poluição e as emissões de gases de efeito estufa (GEE) aumentaram. Milhões de toneladas de resíduos continuam sendo geradas anualmente enquanto bilhões de pessoas ainda não têm acesso adequado à coleta (Oliveira *et al.*, 2023).

A maneira irresponsável de descartar resíduos não respeita fronteiras geográficas, uma vez que as emissões provenientes da queima ou do despejo ao ar livre se acumulam nos ecossistemas terrestres e aquáticos, além de afetarem a atmosfera naturalmente limpa do

planeta. A poluição gerada por essas práticas está associada a diversos impactos prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente como um todo. Muitos desses impactos podem perdurar por várias gerações, conforme apontado por (Oliveira *et al.*, 2023).

À medida que as nações progridem economicamente, é possível notar um crescimento na industrialização das áreas urbanas juntamente com mudanças nos modelos de habitação. Essas alterações refletem diretamente nos hábitos de consumo além da ampliação da variedade de produtos disponíveis no mercado. Esses elementos contribuem significativamente para o aumento na produção per capita de resíduos sólidos urbanos (RSUs), como ilustrado na Figura 1.

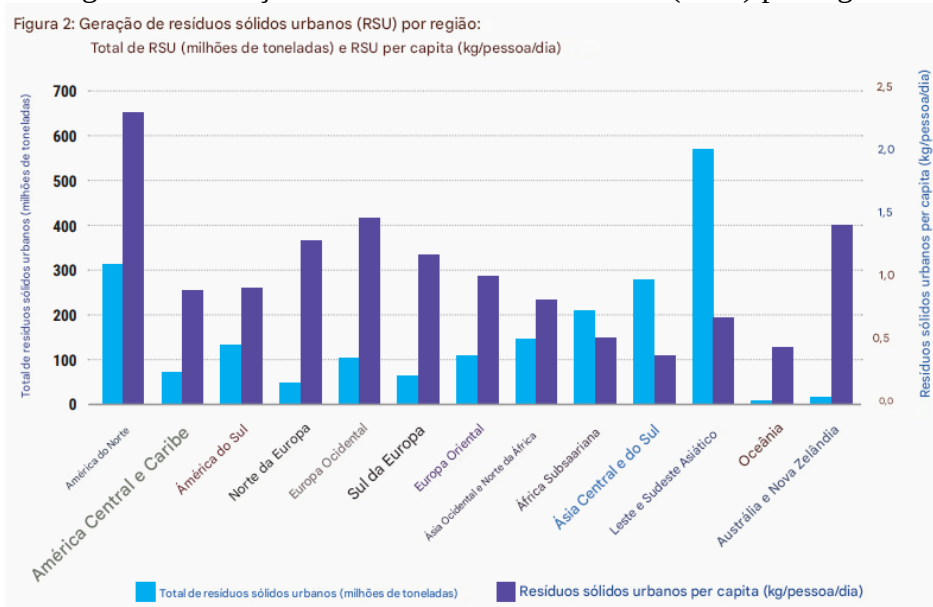
Figura 1 – Relação entre produto interno bruto (PIB) e geração de resíduos entre 2010 e 2020



Fonte: Global Waste Management (2024)

De acordo com o relatório da Global Waste Management (2024), em países ou regiões com alta produção total de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), é possível que a taxa de produção per capita seja relativamente baixa. Por exemplo, locais como América do Norte e Ásia Central e do Sul geram quantidades semelhantes de RSU, mas as quantidades por pessoa variam consideravelmente. Além disso, o número de países de rendimento médio em rápido crescimento está aumentando, o que destaca os desafios na gestão dos resíduos (Figura 2).

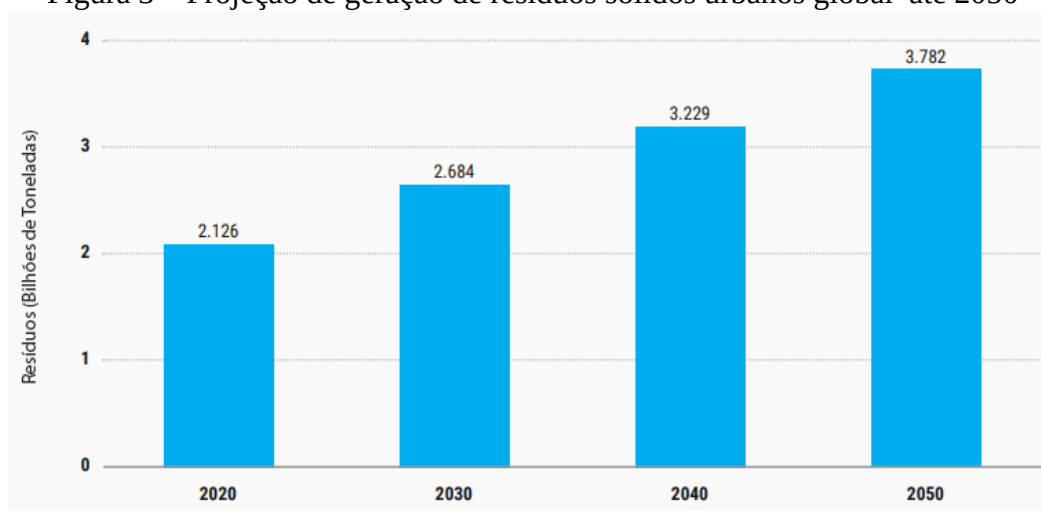
Figura 2 – Geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) por região



Fonte: Global Waste Management (2024)

Em 2020, estimou-se que a quantidade total de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) gerada globalmente tenha sido de aproximadamente 2 bilhões de toneladas anualmente. Devido ao crescimento econômico e populacional, prevê-se que esse número aumentará em 56%, atingindo 3 bilhões de toneladas por ano até 2050, a menos que medidas rápidas sejam implementadas.

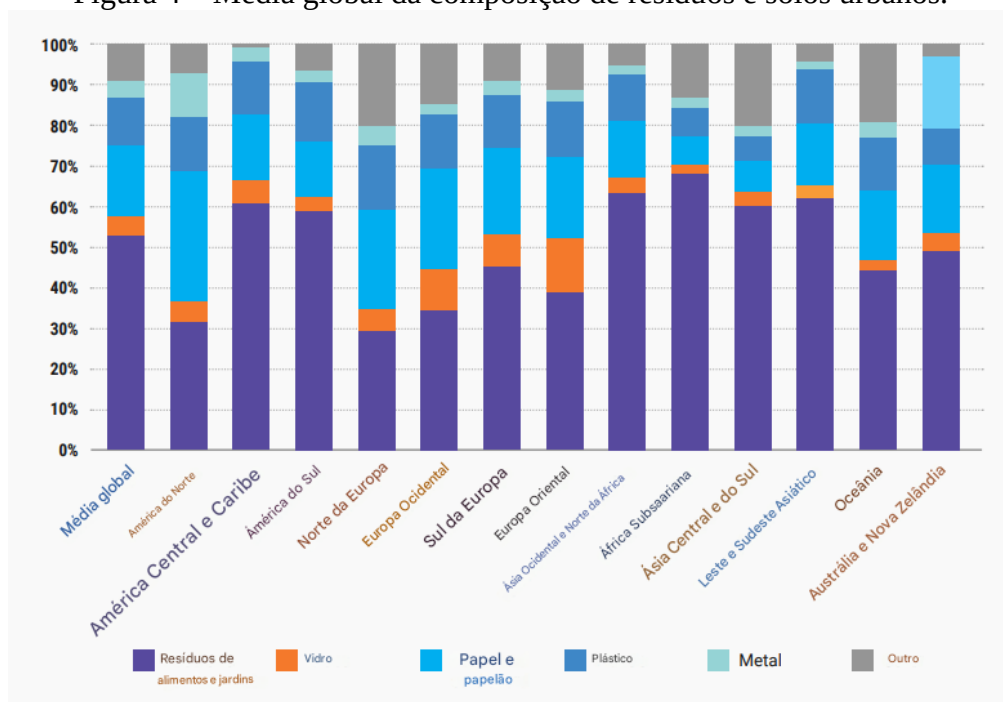
Figura 3 – Projeção de geração de resíduos sólidos urbanos global até 2050



Fonte: Global Waste Management (2024)

A composição dos resíduos também é influenciada pelos níveis de renda. A Figura 4 ilustra a composição dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), apresentando a média global (à esquerda) seguida pelas composições regionais.

Figura 4 – Média global da composição de resíduos e solos urbanos.



Fonte: Global Waste Management (2024)

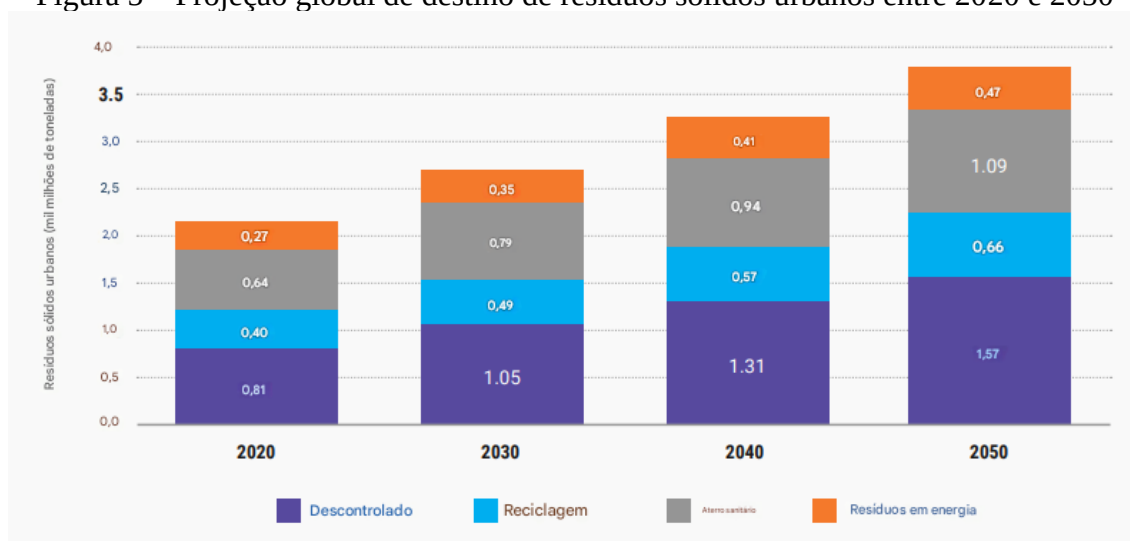
Em regiões de países com menor poder aquisitivo há uma maior quantidade de pessoas vivendo nas zonas rurais próximas às áreas de produção de alimentos. Nessas localidades, menos embalagens são utilizadas para transportar os alimentos até os centros urbanos resultando em menos resíduos de embalagens nos resíduos sólidos urbanos - RSU - como observado na composição dos RSU na África Subsaariana e na América do Sul onde há uma proporção maior de resíduos alimentares. Esses dados não apontam para um aumento significativo no desperdício de alimentos, mas sim uma redução na quantidade de resíduos de embalagens no contexto geral do Gerenciamento Global de Resíduos Sólidos Urbanos em 2024.

Por outro lado, em países mais desenvolvidos economicamente e urbanizados, a necessidade de garantir a segurança no transporte de alimentos das áreas rurais para os centros urbanos promove uma maior procura por embalagens (Chen, 2018). Além disso, o consumo nesses países costuma privilegiar a praticidade, resultando em um aumento do volume de resíduos originários de produtos descartáveis, entregas à domicílio (Ellisson *et al.*, 2022). Consumidores com maior capacidade financeira tendem a investir mais em itens como vestuário e artigos de higiene pessoal (classificados como "Outros" na Figura 4). Esse padrão de consumo é observado na composição dos RSU na América do Norte e nas regiões do Norte e Oeste da Europa.

Além do rendimento financeiro das pessoas influenciar a composição dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), outros elementos também desempenham um papel significativo: o clima (que pode aumentar a produção de resíduos de jardinagem em regiões com muitas chuvas), a densidade populacional e as tradições culturais (He *et al.*, 2022).

Vê-se, portanto, a variedade de resíduos gerados e suas proporções, o que mostra a importância de práticas de recuperação. Há dois mil anos, os romanos já reciclavam metais e vidros (Freestone, 2015). Apesar dessa longa trajetória, atualmente apenas 19% dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são reciclados (Figura 5). Esses materiais incluem metais, vidro, papel, papelão, alguns tipos de plástico e resíduos biodegradáveis tratados por compostagem ou digestão anaeróbica para a geração de biogás.

Figura 5 – Projeção global de destino de resíduos sólidos urbanos entre 2020 e 2050



Fonte: Global Waste Management (2024)

Tanto a reutilização quanto a reciclagem contribuem para reduzir a demanda por extração de matérias-primas, que é um processo intensivo em energia e prejudicial ao meio ambiente (Mendiola *et al.*, 2022). Além disso, essas práticas valorizam os resíduos como recursos e evitam a poluição resultante do descarte inadequado. Entretanto, a Figura 5 mostra não haver uma grande diferença na porcentagem de reciclagem ao longo das próximas décadas.

Portanto, abordar o tema da geração de resíduos sob a perspectiva da sustentabilidade ambiental é crucial para a construção de um futuro mais equilibrado e saudável. A sustentabilidade, nesse contexto, não se refere apenas à preservação do meio ambiente, mas também à capacidade de as gerações atuais atenderem às suas necessidades sem comprometer os recursos para as gerações futuras. Assim, a gestão dos resíduos deve ser

vista como um elemento chave para a promoção de um desenvolvimento mais responsável.

A integração de práticas sustentáveis na gestão de resíduos não é apenas uma obrigação legal, mas também um imperativo moral. As empresas, governos e cidadãos precisam reconhecer que os resíduos gerados são reflexo direto de nossos padrões de consumo e produção. Portanto, repensar esses padrões, adotar medidas de redução, reutilização e reciclagem, e promover a conscientização coletiva são passos fundamentais para mitigar os impactos negativos associados à geração de resíduos.

2.1.2. Geração de Resíduos no Brasil

O crescimento econômico do Brasil nas últimas décadas trouxe uma série de transformações sociais e urbanas que impactaram diretamente a produção de resíduos. À medida que a economia se expande, impulsionada por setores como a construção civil, a indústria e o comércio, a quantidade de resíduos gerados aumenta proporcionalmente. Esse crescimento, embora positivo em muitos aspectos, também revela um ponto negativo: a pressão sobre os sistemas de gestão de resíduos, que muitas vezes não conseguem acompanhar a velocidade da urbanização e do consumo (Freestone, 2015).

A produção crescente de resíduos no Brasil apresenta desafios complexos, especialmente em relação à infraestrutura disponível para lidar com esse volume. A coleta seletiva, por exemplo, ainda é uma realidade distante para a maioria das cidades brasileiras, o que resulta em grande parte dos resíduos sendo descartados em aterros sanitários, lixões a céu aberto ou mesmo em áreas naturais. Esse cenário é agravado pela falta de educação ambiental e conscientização da população sobre a importância do descarte correto e da reciclagem (Freestone, 2015).

De acordo com Freestone (2015), a gestão inadequada de resíduos gera consequências diretas e indiretas para o meio ambiente e a saúde pública. A contaminação de solos, lençóis freáticos e cursos d'água é uma das consequências mais graves, além da emissão de gases de efeito estufa decorrente da decomposição de resíduos orgânicos em aterros. Além disso, a presença de resíduos em áreas urbanas contribui para a proliferação de pragas e doenças, afetando a qualidade de vida da população, especialmente nas regiões mais vulneráveis.

Diante dos desafios no gerenciamento de resíduos, torna-se evidente a necessidade de desenvolver e implementar estratégias eficazes. Isso não envolve apenas a melhoria dos

sistemas de coleta e destinação, mas também a promoção de políticas públicas que incentivem a redução da geração de resíduos, a reutilização de materiais e a reciclagem. Nesse processo, as empresas desempenham um papel fundamental, podendo adotar práticas de produção mais limpas e fomentar a economia circular. Para que essas políticas sejam bem-sucedidas, é necessário adotar uma abordagem integrada, que envolva o poder público, a iniciativa privada e a sociedade civil. Criar uma cultura de responsabilidade compartilhada, em que todos compreendam a importância de seu papel na cadeia de geração e destinação de resíduos, é essencial. Essa conscientização representa o primeiro passo para a construção de um sistema de gestão de resíduos mais sustentável e eficiente.

Um dos setores que mais contribuem para a produção de resíduos no Brasil é a construção civil. Em 2023, o Brasil apresentou um pequeno acréscimo (inferior a 1%) na quantidade de RSU gerados por pessoa. De acordo com o Panorama, a quantidade de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) gerada por pessoa no país apresentou um pequeno crescimento, inferior a 1%. De acordo com o Panorama de Resíduos Sólidos de 2023, cada brasileiro gerou, em média, 1,047 kg de lixo por dia. Considerando a estimativa populacional do IBGE para o mesmo ano, a produção total de resíduos no país chegou a cerca de 81 milhões de toneladas ao longo do ano, o que equivale a mais de 221 mil toneladas descartadas diariamente. Esse volume corresponde a aproximadamente 382 kg de lixo por habitante no período de 12 meses (Figura 6).

Figura 6 – Geração de RSU no Brasil em 2023

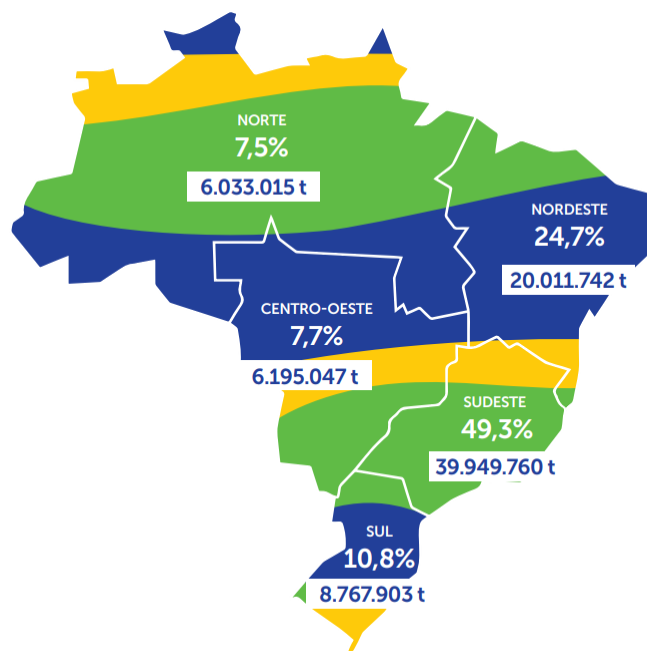


Fonte: Panorama de Resíduos Sólidos (2023)

Ao analisar as regiões do país, o Sudeste continua sendo a que mais gera resíduos, tanto em quantidade total quanto per capita. Em 2023, a média por pessoa na região subiu cerca de 0,6%, atingindo 452 kg ao longo do ano, o que representa 1,237 kg por dia. No total, a geração de resíduos no Sudeste cresceu 0,9% em comparação com 2022, chegando a aproximadamente 39,9 milhões de toneladas no ano, ou 109 mil toneladas diárias. Isso

significa que quase metade de todo o lixo produzido no Brasil tem origem nessa região (Figura 7).

Figura 7 – Geração de RSU no Brasil em 2023 por região



Fonte: Panorama de Resíduos Sólidos (2023)

Em contrapartida, a região Sul apresentou a menor média per capita, com cada habitante gerando cerca de 284 kg de resíduos ao ano, o que equivale a 0,779 kg por dia. Já em volume total, o Norte foi a região que menos contribuiu para a geração nacional de resíduos, representando 7,5% do total. Ao longo de 2023, a região produziu cerca de 6 milhões de toneladas de lixo, o que corresponde a aproximadamente 16,5 mil toneladas por dia (Figura 7).

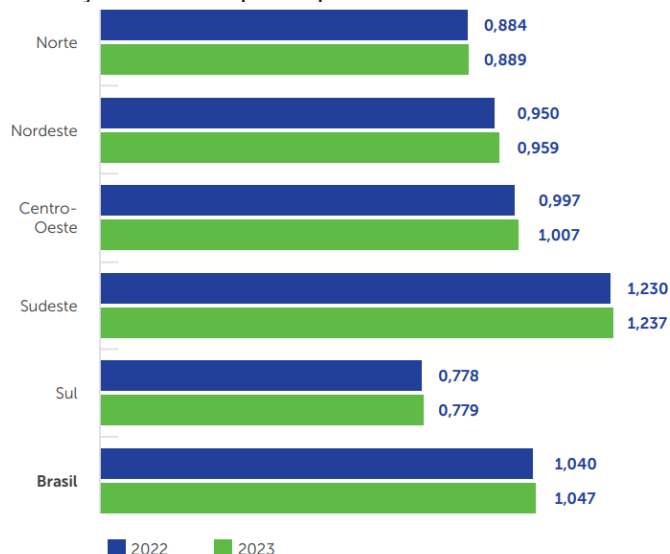
A Figura 8 apresentada a geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) per capita nas diferentes regiões do Brasil nos anos de 2022 e 2023. Observa-se que, de maneira geral, houve um aumento na geração de resíduos entre os dois anos em todas as regiões analisadas, com exceção da região Sul, onde a diferença é mínima. A região com a maior quantidade de resíduos gerados per capita é o Sudeste, com um valor de 1,230 kg em 2022, aumentando para 1,237 kg em 2023. As demais regiões apresentam variações mais modestas.

A região Norte tem o menor índice de geração de resíduos, com 0,884 kg per capita em 2022, alcançando 0,889 kg em 2023. Já o Centro-Oeste apresentou o menor aumento absoluto, indo de 0,997 kg para 1,007 kg. Esse comportamento pode ser atribuído a diversos fatores socioeconômicos e demográficos que influenciam a geração de resíduos

nas diferentes regiões do país, como a densidade populacional, a urbanização e o consumo de bens.

O aumento na geração de resíduos pode refletir, entre outros aspectos, o crescimento urbano e a maior produção de bens de consumo, que geram mais resíduos. Este dado é relevante para políticas públicas voltadas à gestão de resíduos, indicando a necessidade de estratégias diferenciadas para cada região, considerando suas particularidades e realidades locais.

Figura 8 – Geração de RSU per capita no Brasil em 2022/2023 por região



Fonte: Panorama de Resíduos Sólidos (2023)

2.1.3. Resíduos da Construção Civil (RCC)

A construção civil, essencial para o desenvolvimento urbano e econômico, está intrinsecamente ligada ao aumento do consumo de materiais, porém é amplamente reconhecida como uma das principais fontes de geração de resíduos no Brasil. Desde a construção de grandes empreendimentos até pequenas reformas, a quantidade de resíduos gerados é expressiva e diversificada, englobando materiais como concreto, madeira, metais, plásticos, entre outros.

A Resolução CONAMA nº 307, emitida pela Comissão Nacional do Meio Ambiente em 5 de julho de 2002, estabelece diretrizes regulatórias para a gestão dos resíduos gerados pela construção civil, visando definir os critérios e procedimentos necessários para seu manejo adequado. Ela marca um avanço significativo no processo de agregar valor a esses resíduos. De acordo com a resolução, os resíduos da construção civil são aqueles provenientes da construção, reformas, reparos e demolição de edificações, bem como os subprodutos resultantes dessas atividades. Esses materiais incluem itens originados da

preparação e escavação do terreno, como tijolos, blocos cerâmicos, concreto, solo, rocha, metal, resina, cola, tinta, madeira, compensado, telhas, argamassa, gesso, telhas, asfalto, vidro, plástico, canos, fios, entre outros, frequentemente chamados de resíduos de construção.

Segundo Nunes *et al.* (2019), os resíduos da construção civil (RCC) possuem características que os diferenciam dos resíduos sólidos urbanos comuns. Primeiramente, a composição desses resíduos varia significativamente de acordo com o tipo de obra, o estágio da construção e as técnicas utilizadas. Além disso, muitos desses resíduos são volumosos e pesados, o que dificulta seu transporte e disposição final. Outro aspecto importante é a presença de resíduos perigosos, como tintas, solventes e outros produtos químicos, que requerem manejo especial para evitar contaminação ambiental.

A classificação dos resíduos da construção civil (RCC) segue o estabelecido no Art. 3º da Resolução CONAMA 307/2002, que os divide em quatro categorias, sendo as classes A e B destinadas a resíduos recicláveis. Em 2004, a resolução foi alterada pela CONAMA 348/04, que incluiu o amianto na classe de resíduos perigosos. Em 2011, o gesso foi transferido para a classe dos resíduos recicláveis por meio da Resolução nº 431/11. A última alteração relevante na resolução ocorreu em 2012 com a CONAMA 448/12, sem modificações na classificação dos resíduos.

A gestão inadequada dos RCC pode gerar impactos ambientais severos. A disposição irregular desses materiais, seja em aterros controlados, lixões ou áreas de descarte clandestinas, contribui para a degradação do solo e dos recursos hídricos, além de representar um desperdício significativo de recursos que poderiam ser reaproveitados. A reciclagem de materiais como concreto, tijolos e metais, por exemplo, pode reduzir a demanda por matérias-primas virgens e diminuir a pressão sobre os ecossistemas naturais, (Chen *et al.*, 2019).

Para garantir uma gestão eficaz dos RCC's, LI *et al.*, (2015), ressaltam a importância da gestão adequada dos resíduos da construção civil que vão além da questão ambiental. Ela também envolve aspectos econômicos e sociais. A criação de cadeias produtivas para o reaproveitamento desses materiais pode gerar empregos e promover o desenvolvimento de tecnologias mais sustentáveis. Bao, Lee e Lu (2020), complementam que o manejo correto dos RCC contribui para a melhoria da qualidade de vida nas cidades, ao reduzir a poluição visual e os riscos à saúde pública associados ao descarte inadequado.

Neste contexto, torna-se imprescindível a implementação de políticas e práticas que promovam a gestão sustentável dos RCC. Isso inclui a adoção de técnicas construtivas que minimizem a geração de resíduos, o incentivo à utilização de materiais recicláveis e a capacitação de profissionais da construção civil para a gestão adequada desses resíduos. A responsabilidade pela gestão dos RCC deve ser compartilhada entre governos, empresas e consumidores, de modo a garantir um ciclo de vida mais sustentável para os materiais de construção (LI *et al.*, 2015).

A adoção de práticas sustentáveis no gerenciamento de resíduos é crucial para a redução dos impactos ambientais e para o fomento do desenvolvimento econômico. Para atingir esse objetivo, três princípios fundamentais devem ser seguidos: minimizar a geração de resíduos, reaproveitar materiais sempre que possível e transformar resíduos em novos insumos produtivos. Estes princípios estão alinhados com as diretrizes estabelecidas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010), que propõe uma abordagem sistemática para o manejo de resíduos.

Dentro desse contexto, a reciclagem é uma das alternativas destacadas, embora exija consumo energético para converter os resíduos em novas matérias-primas, viabilizando a produção de produtos reutilizáveis. Em contrapartida, a reutilização se apresenta como uma solução mais simples e eficaz, pois envolve o reaproveitamento de materiais sem a necessidade de transformação, o que contribui para a redução de poluição e desperdício, sendo, portanto, uma prática ecologicamente vantajosa. Contudo, o princípio central de todas essas abordagens é a redução. Ao focar na diminuição do consumo de bens e insumos, a redução não apenas evita a geração de resíduos, mas também diminui a necessidade de processos como a reciclagem e a reutilização, estabelecendo-se, assim, como a base para uma gestão de resíduos mais eficiente e sustentável.

Entretanto, mesmo quando se propõe a reciclagem, esta quando é aplicada de maneira eficiente na gestão dos resíduos, se torna uma ferramenta estratégica para fortalecer a economia nacional

Um estudo realizado por Islam *et al.*, (2019) demonstrou que, em Bangladesh, a reciclagem de resíduos de concreto (0,576 Mt) e tijolos (0,269 Mt) resulta em um impacto econômico significativo, agregando aproximadamente 44,96 milhões de dólares anualmente à economia do país. Shooshtarian *et al.*, (2020) reforçaram que a aplicação de materiais reciclados provenientes de RCD é uma alternativa viável. Contudo, os pesquisadores ressaltaram que a definição clara do papel das partes interessadas e a

superação dos desafios envolvidos no uso de materiais reciclados são fatores fundamentais para a ampliação dessa prática.

Kabirifar *et al.*, (2020) identificaram elementos essenciais para a gestão eficiente de RCD, incluindo: (i) a hierarquização de estratégias com foco na redução, reutilização e reciclagem, levando em consideração fatores que influenciam a eficácia dessas abordagens; (ii) aspectos práticos da gestão, como a viabilidade econômica, a conscientização das partes envolvidas e a análise do ciclo de vida dos produtos. A busca por um modelo sustentável de desenvolvimento requer um uso mais eficiente dos recursos naturais, e isso pode ser alcançado por meio da economia circular. Esse conceito propõe uma transição da economia linear, baseada na extração, produção e descarte, para um modelo que privilegie o reaproveitamento e a regeneração de materiais. A economia circular preconiza a redução da dependência de matérias-primas virgens e incentiva o uso de insumos recicláveis e renováveis, garantindo maior eficiência nos processos produtivos. Shooshtarian *et al.*, (2021) complementam que políticas que priorizam a redução da geração de resíduos são fundamentais para consolidar um sistema produtivo mais sustentável e economicamente viável.

Vê-se portanto, um amplo espectro de resíduos gerados pela construção civil e como podem ser utilizados para a redução do impacto ambiental. Dentre esses resíduos, a serragem de madeira, foco desse trabalho, merece atenção devido às suas especificidades e aos desafios diversos que possui.

2.1.4. Resíduos de Madeira na Construção Civil

A madeira é um dos materiais mais utilizados na construção civil, seja na forma de estruturas, acabamentos ou como parte do mobiliário. Como consequência desse amplo uso, a quantidade de resíduos de madeira gerado nas obras é significativa. Esses resíduos podem incluir pedaços de madeira inutilizados, sobras de cortes e, principalmente, serragem, que é gerada em grande quantidade durante o processamento da madeira. A gestão desses resíduos é um desafio, tanto pela quantidade gerada quanto pelas características específicas desse material (Barbosa *et al.*, 2024).

Este material, que frequentemente é visto como um resíduo de difícil manejo, pode, no entanto, ser reaproveitado em diversas aplicações, como na fabricação de painéis de madeira aglomerada, briquetes para combustão, ou até mesmo como material de enchimento em alguns processos construtivos.

Estudos indicam que, em edificações residenciais térreas com estrutura de concreto armado moldado in loco, o consumo de madeira para fins provisórios varia entre 0,042 e 0,076 metros cúbicos por metro quadrado de área construída. Isso significa que uma residência de 100 metros quadrados pode demandar de 4,2 a 7,6 metros cúbicos de madeira apenas para estruturas temporárias. Após o uso, grande parte dessa madeira é descartada, contribuindo para o aumento dos resíduos no setor (Oliveira *et al.*, 2023).

A gestão inadequada desse material apresenta desafios específicos e pode acarretar diversos problemas ambientais. Por ser um material leve e volumoso, pode ser facilmente disperso pelo vento, contaminando áreas adjacentes e causando problemas respiratórios para trabalhadores e a população ao redor. Além disso, quando descartada de forma irregular, a serragem pode se acumular em terrenos baldios e locais inadequados, contribuindo para a degradação ambiental, obstruindo redes de drenagem e aumentando o risco de incêndios e enchentes. Sua decomposição em aterros libera metano, um gás de efeito estufa que agrava as mudanças climáticas. Diante desses impactos, é essencial adotar práticas de reutilização e reciclagem, minimizando os danos ambientais e promovendo a sustentabilidade no setor (Hasan *et al.*, 2022).

No entanto, Hasan *et al.*, (2022), citam que apesar desses desafios, a serragem possui um grande potencial de reaproveitamento que pode ser explorado para minimizar seu impacto ambiental. Uma das alternativas mais promissoras é o uso da serragem na produção de biomassa para a geração de energia. A serragem pode ser compactada em briquetes, que servem como combustível renovável em sistemas de aquecimento e geração de eletricidade. Além disso, a serragem também pode ser utilizada na fabricação de compostos para o solo, enriquecendo a matéria orgânica em áreas de cultivo agrícola.

Outra forma de reutilização da serragem é na indústria de materiais de construção, onde ela pode ser incorporada em misturas para a fabricação de blocos de construção, painéis de madeira e outros produtos à base de madeira, contribuindo para a redução da demanda por novos recursos florestais. Além disso, a serragem também tem se mostrado útil na produção de concretos, argamassas e pastas, onde pode atuar como um aditivo, melhorando algumas propriedades do material, como a trabalhabilidade, isolamento térmico e a durabilidade. Ao ser utilizada dessa maneira, a serragem não apenas contribui para a economia circular, mas também oferece uma alternativa sustentável, diminuindo a dependência de insumos tradicionais e promovendo a reutilização de resíduos no setor da construção civil (Hasan *et al.*, 2022).

Para que as alternativas sustentáveis sejam amplamente adotadas, é necessário superar diversas barreiras, como a falta de conhecimento técnico e a ausência de políticas públicas que incentivem o reaproveitamento de resíduos de madeira. Além disso, é crucial sensibilizar as empresas do setor de construção sobre os benefícios ambientais e econômicos de uma gestão responsável da serragem. A capacitação de profissionais e a implementação de normativas específicas são passos importantes para tornar o manejo dos resíduos de madeira mais eficiente e sustentável (Oliveira *et al.*, 2023).

Dentro desse contexto, a economia circular surge como uma solução promissora ao modelo linear convencional, que é baseado no ciclo de "extrair-produzir-descartar". Ao contrário desse modelo, a economia circular propõe um ciclo contínuo de reaproveitamento, no qual materiais são constantemente reutilizados, reduzindo impactos ambientais e promovendo o uso eficiente dos recursos. A Ellen MacArthur Foundation (2013) aponta que a aplicação de práticas circulares poderia gerar uma economia anual na Europa de até US\$ 630 bilhões apenas nos setores de bens de consumo. Ao incorporar materiais como a madeira nesse ciclo, não só é possível reduzir a produção de resíduos, mas também gerar benefícios econômicos e ambientais significativos.

No caso da madeira, quando descartada inadequadamente, seu impacto ambiental pode ser considerável. O acúmulo de madeira em lixões municipais, a poluição do ar gerada durante sua decomposição e o desperdício de um recurso natural valioso são consequências claras desse modelo de descarte. Segundo dados de Zhang *et al.*, (2024), cerca de 30% do lixo sólido urbano nos países em desenvolvimento consiste em materiais orgânicos, incluindo madeira. No entanto, ao se considerar a madeira dentro do contexto da economia circular, ela pode ser recuperada, processada novamente e reincorporada ao ciclo de produção, seja como novos produtos, energia ou matéria-prima para diversos setores industriais. Essas práticas não apenas minimizam a produção de resíduos, mas também criam valor econômico e ambiental para os materiais reaproveitados.

A economia circular, portanto, não é apenas uma alternativa ao modelo linear de produção e consumo; ela propõe uma mudança radical na maneira como entendemos o uso dos recursos. Em vez de pensar em termos de extração, uso e descarte, a economia circular desafia a sociedade a conceber um ciclo contínuo, no qual o fim de um processo marca o início de outro. No entanto, essa mudança não ocorre apenas com a implementação de novas tecnologias ou políticas públicas. Ela exige uma transformação na mentalidade coletiva. Geissdoerfer *et al.*, (2017) destacam que, embora 70% dos consumidores em países desenvolvidos estejam dispostos a adotar práticas mais sustentáveis, eles ainda

enfrentam obstáculos como a falta de informações e o acesso limitado a produtos circulares.

Nos dias atuais, nossa sociedade promove excessivamente o consumo e o desperdício de recursos de forma descontrolada e inconsciente. De acordo com o Banco Mundial, até 2050, a geração global de resíduos sólidos deve aumentar em 70%, atingindo 3,4 bilhões de toneladas por ano. A economia circular nos convida a questionar essa lógica e a refletir sobre o verdadeiro custo ambiental e social de cada recurso que utilizamos, seja um minério, uma árvore ou uma gota de água.

Para que a economia circular se materialize efetivamente, é fundamental investir em educação consciente. Essa educação precisa ir além de ensinar sobre reciclagem e reutilização, estimulando uma análise crítica dos nossos padrões de consumo e de sua influência sobre o meio ambiente. As instituições de ensino, as empresas e o governo desempenham um papel essencial nesse processo, promovendo programas educacionais que mostrem como pequenas ações do cotidiano — como evitar o uso de produtos descartáveis, separar corretamente os resíduos ou privilegiar produtos locais — podem ter um impacto significativo no total. Além disso, é fundamental engajar as comunidades no processo decisório, garantindo que as políticas de economia circular sejam inclusivas e adaptadas às necessidades e peculiaridades locais. Esse movimento, ao ser incorporado de forma ampla, promove uma verdadeira transformação para uma sociedade que valoriza o reaproveitamento de recursos, estabelecendo uma relação mais equilibrada entre

2.1.5. Conclusão

O capítulo aborda a gestão de resíduos na construção civil de forma integrada, destacando tanto os desafios quanto as soluções que podem contribuir para um setor mais sustentável. A discussão começa com uma análise global sobre a crescente geração de resíduos, mostrando que, com o aumento da urbanização e industrialização, os resíduos sólidos urbanos (RSUs) se tornaram um problema cada vez mais complexo. A previsão é de que, até 2050, a quantidade de resíduos gerados no mundo cresça em 56%, colocando uma pressão enorme nos sistemas de gestão e destacando a urgência de repensarmos nossos padrões de consumo e descarte.

No cenário da construção civil, a situação não é diferente. A indústria é uma das maiores responsáveis pela produção de resíduos, seja na construção de grandes edifícios ou nas pequenas reformas residenciais. O impacto ambiental desse setor é considerável, mas a

boa notícia é que já existem alternativas que buscam reduzir esses danos, como o uso de bioconcretos. Esses materiais, compostos por resíduos reciclados, como a serragem de madeira, ajudam a minimizar a pegada ecológica da construção, além de promoverem o reaproveitamento de materiais que, de outra forma, seriam descartados. A utilização de bioconcretos não apenas contribui para a sustentabilidade ambiental, mas também oferece melhorias nas propriedades dos próprios materiais de construção, como o isolamento térmico, essencial para reduzir o consumo de energia nas edificações.

Dado o contexto apresentado, torna-se evidente que a gestão adequada dos resíduos de madeira, especialmente da serragem, é uma necessidade urgente para minimizar os impactos ambientais e aproveitar o potencial de reaproveitamento desse material. No entanto, os impactos ambientais da geração de resíduos na construção civil não se limitam à serragem.

A adoção de soluções que promovam o reaproveitamento e a reciclagem dos resíduos de madeira pode reduzir significativamente a quantidade de material descartado em aterros e lixões, diminuindo, assim, os riscos associados à sua decomposição e liberação de gases nocivos. Além disso, práticas sustentáveis contribuem para a conservação dos recursos naturais, uma vez que reduzem a necessidade de extração de madeira nova, preservando as florestas e a biodiversidade.

Outro aspecto importante a considerar é o impacto social da gestão inadequada dos resíduos de madeira. Comunidades que vivem próximas a áreas de descarte irregular ou depósitos de resíduos muitas vezes sofrem com a poluição e os riscos à saúde associados a esses locais. O desenvolvimento de práticas de gestão sustentável de resíduos pode, portanto, melhorar a qualidade de vida dessas populações, ao mesmo tempo em que promove o desenvolvimento econômico local por meio da criação de empregos e oportunidades na indústria da reciclagem.

Por fim, é essencial que as práticas sustentáveis na gestão de resíduos de madeira sejam incorporadas em um contexto mais amplo de políticas públicas e regulamentações ambientais. A implementação de normas que incentivem a reciclagem e o reaproveitamento de resíduos, juntamente com a fiscalização efetiva do descarte adequado, são passos fundamentais para garantir que os impactos ambientais da geração de resíduos sejam minimizados. Essas medidas, quando combinadas com a conscientização e a educação ambiental, podem criar uma cultura de responsabilidade e sustentabilidade que beneficie tanto o meio ambiente quanto a sociedade.

Governos, em todas as esferas, podem implementar normas que obriguem as empresas a adotar práticas de gerenciamento de resíduos, desde a separação e coleta seletiva até o reaproveitamento e reciclagem. Além disso, incentivos fiscais e linhas de crédito para projetos sustentáveis podem estimular ainda mais o setor da construção a investir em tecnologias limpas e em processos que minimizem a geração de resíduos.

Além disso, a colaboração entre diferentes setores da sociedade é fundamental para o sucesso das estratégias de gestão sustentável. Parcerias entre empresas, governos, ONGs e instituições de pesquisa podem promover o desenvolvimento de novas tecnologias e soluções inovadoras para o reaproveitamento de resíduos. Essas colaborações também são importantes para sensibilizar a sociedade sobre a importância da sustentabilidade e para mobilizar esforços coletivos em prol de um futuro mais verde e responsável.

Diante das diversas estratégias possíveis, é crucial que a gestão sustentável de resíduos seja vista como uma responsabilidade compartilhada, que envolve todos os atores da sociedade.

2.2. Os bioconcretos e sua utilização a partir do resíduo de madeira

2.2.1. O uso da Madeira na Construção Civil

A madeira é um dos materiais mais antigos utilizados na construção civil. Os primeiros registros de utilização da madeira como material de construção datam de mais de 10.000 anos atrás, na época em que as primeiras moradias começaram a ser construídas.

Inicialmente, a madeira era utilizada para a construção de estruturas simples, como cabanas e cercas. Com o tempo, a técnica de utilização da madeira foi aprimorada e novos tipos de edificações começaram a ser construídos, como casas, igrejas, pontes e palácios.

Na Ásia, a madeira tem sido utilizada na construção de edifícios há milhares de anos, especialmente em áreas rurais e em construções tradicionais

Na China a técnica de construção em madeira envolve o uso de peças de madeira. Esta técnica envolve o uso de peças de madeira entalhadas e encaixadas umas nas outras, sem a necessidade de pregos ou parafusos. É comum em templos, palácios e outros edifícios tradicionais chineses.

No Japão, os carpinteiros usam madeira de cedro e pinheiro, que podem resistir a terremotos e outros desastres naturais. Os edifícios construídos desta forma são frequentemente encontrados em templos, santuários e casas tradicionais japonesas. Um

exemplar notável é o templo Horyuji, situado na província de Nara, no Japão. O complexo é composto por diversos edifícios, sendo o mais proeminente este de cinco andares. Esse é considerado o edifício de madeira mais antigo e bem preservado do mundo, com mais de 1.400 anos de idade e uma altura impressionante de 32,25 metros.

Na Índia, a construção de templos em madeira é uma tradição que remonta a milhares de anos, e muitos dos templos antigos da Índia foram construídos inteiramente em madeira, sendo comum, também, em casas tradicionais, especialmente nas áreas rurais.

O uso da madeira no Brasil remonta a tempos históricos. Os povos indígenas já a utilizavam para a construção de suas habitações, utensílios e canoas. Com a chegada dos colonizadores europeus, a exploração da madeira tornou-se uma atividade econômica importante para a produção de móveis, construção naval, papel e carvão vegetal, entre outros produtos. A madeira também foi amplamente utilizada na construção de edifícios históricos, como igrejas, casas e fortalezas. No entanto, a exploração desordenada e a falta de políticas de preservação ambiental levaram à degradação de muitas áreas florestais, o que destacou a importância da gestão sustentável da floresta e da busca por alternativas para a utilização da madeira. Com isso, o uso da madeira passou a ser limitado a aplicações como esquadrias, assoalhos, forros e estruturas de telhado. As construções em madeira desse período eram geralmente de baixa qualidade e técnica construtiva, sendo acessíveis apenas para a população de menor poder aquisitivo. Essas construções utilizavam paredes de taipa à mão, que consistiam em uma mistura de madeira e barro (Shigue, 2018).

A partir da metade do século XIX, a chegada de imigrantes não portugueses ao Brasil trouxe mudanças significativas ao cenário nacional, substituindo a mão de obra escravizada até então utilizada. Com a mão de obra qualificada e a introdução de novos equipamentos trazidos da Europa, as casas construídas com tijolos se popularizaram (Santos; Aguilar, 2007).

Apesar de a madeira ter sido uma das principais matérias-primas utilizadas pelo setor da construção até o século XX, seu uso como principal material de construção foi declinando com o desenvolvimento de novas técnicas construtivas, em especial do concreto armado (Fernandes, 2013). A construção em madeira foi perdendo espaço, sendo associada a algo precário, temporário, de baixa qualidade arquitetônica e de baixa durabilidade em comparação com o concreto, noções que ainda prevalecem na maioria da população até hoje.

Ao longo da história, as técnicas de uso e manipulação da madeira foram se desenvolvendo em diversas regiões do planeta, incluindo o Brasil, onde a madeira foi o material predominante na construção das edificações dos povos indígenas. O seu contínuo desenvolvimento culminou em uma grande variedade de produtos, sistemas construtivos e aplicações, sendo até hoje um material muito utilizado na construção civil (Shigue, 2018).

A madeira está presente em praticamente todas as etapas das obras de construção civil no Brasil, desde as fôrmas, estruturas, escoramentos, esquadrias, pisos, forros, revestimentos até a mobília final. No entanto, seu uso se restringe a elementos secundários nas edificações (Paiva Filho *et al.*, 2018).

No Brasil, ao longo dos anos, a madeira tem enfrentado uma resistência considerável como material de construção. Esse preconceito surgiu em grande parte devido à percepção de que a madeira é um material frágil e de baixa durabilidade, o que pode levar à desvalorização do imóvel. Além disso, o uso indiscriminado da madeira durante o período colonial do país, bem como a sua exploração excessiva e a falta de controle ambiental, contribuíram para uma visão negativa sobre o uso da madeira na construção civil. De acordo com dados coletados pelo IBGE nas últimas quatro décadas, houve uma redução expressiva na porcentagem de habitações construídas em madeira no Brasil. Anteriormente, essas habitações representavam um total de 20,2% do total de moradias no país, porém, atualmente, essa proporção é de apenas 6,8% (IBGE, 2019).

A madeira é um material orgânico de origem vegetal, amplamente utilizado em diversas aplicações, que vão desde a construção de casas até a fabricação de utensílios domésticos e ferramentas. Por ser renovável e biodegradável, a madeira desempenha um papel importante na economia global, sendo considerada uma opção ecologicamente correta. No entanto, apesar de suas qualidades, a realidade atual da utilização da madeira muitas vezes se distancia dessas características positivas. Quando empregadas as técnicas adequadas, a madeira pode se tornar tão resistente e durável quanto outros materiais, o que demonstra seu potencial para ser uma alternativa sustentável e eficaz em diversos setores. Nesse contexto, as normas técnicas brasileiras também evoluíram, criando diretrizes que asseguram a qualidade e a segurança no uso da madeira, especialmente na construção civil, complementando seu valor como material renovável e seguro.

Apesar disso, ainda existe uma resistência por parte de alguns setores da sociedade, que associam o uso da madeira a um estilo de vida mais simples e de menor sofisticação

arquitetônica. É importante destacar que, quando utilizada corretamente, a madeira pode agregar valor estético e diferencial ao projeto, além de garantir uma construção mais sustentável e com menor impacto ambiental.

A utilização da madeira traz diversos benefícios, tanto para a construção civil quanto para o meio ambiente, como por exemplo:

- **Sustentabilidade:** a madeira é um material renovável e sustentável, desde que proveniente de fontes responsáveis. A utilização da madeira na construção civil contribui para a redução da emissão de gases de efeito estufa, já que a madeira armazena carbono.
- **Conforto térmico e acústico:** a madeira possui propriedades isolantes que ajudam a manter a temperatura interna do ambiente e reduzir a transmissão de ruídos externos.
- **Durabilidade:** a madeira é um material resistente e durável, desde que seja tratada corretamente. A utilização da madeira tratada pode aumentar a vida útil das estruturas em até 50 anos.
- **Estética:** a madeira é um material versátil e esteticamente agradável, que pode ser utilizado em diversos tipos de construções e ambientes, proporcionando um aspecto mais natural e aconchegante.
- **Facilidade de construção:** a madeira é um material fácil de trabalhar e moldar, o que facilita a construção e possibilita projetos mais complexos e criativos.
- **Redução de resíduos:** a utilização da madeira na construção civil gera menos resíduos e entulhos, em comparação com outros materiais de construção, como o concreto e o aço.
- **Menor consumo de energia:** a produção da madeira consome menos energia do que a produção de outros materiais de construção, como o aço e o concreto.

2.2.2. Introdução ao Bioconcreto e a incorporação de resíduos de madeira

Nos últimos anos a indústria da construção civil tem procurado por soluções que sejam ao mesmo tempo sustentáveis e eficientes para minimizar os impactos ambientais relacionados ao uso dos materiais convencionais na construção. Entre as inovações mais promissoras, destaca-se o bioconcreto - um tipo de material de construção que incorpora resíduos orgânicos como madeira, por exemplo em vez dos materiais tradicionais. O bioconcreto se destaca como uma alternativa moderna no campo da construção civil e está alinhado com as exigências atuais, como por exemplo a sustentabilidade e eficiência

energética. Ao integrar resíduos na sua composição, não apenas ajuda na redução de resíduos sólidos, como também pode melhorar propriedades específicas como isolamento térmico e acústico (Guimarães *et al.*, 2024).

No que se refere à utilização de resíduos de madeira em materiais de construção não é algo recente e tem se tornado um assunto com maior relevância nos últimos tempos devido à crescente preocupação com questões ambientais e sustentabilidade. A indústria madeireira produz uma quantidade considerável de resíduos como serragem e fibras que geralmente são descartados ou incinerados, contribuindo com a poluição ambiental. Recentes estudos indicam que é possível incluir esses resíduos no concreto, não só como substitutos parciais de agregados, mas também para conferir propriedades específicas ao material (Silva *et al.*, 2021). Essa abordagem não apenas reduz o impacto ambiental associado ao descarte de resíduos, mas também apoia a economia circular - um princípio crucial para práticas construtivas sustentáveis.

As vantagens ambientais do uso de resíduos de madeira no bioconcreto são diversas. Em primeiro lugar, ao incorporar esses resíduos há uma redução na extração de recursos naturais como areia e brita comumente utilizados em concretos convencionais. Além disso, o bioconcreto com resíduos de madeira tem uma pegada de carbono menor e mais significativa, uma vez que a produção de cimento, um dos principais componentes do concreto, é responsável por aproximadamente 8% das emissões globais de CO₂ (World Green Building Council, 2019). Logo, substituir parte do cimento por resíduos de madeira pode ajudar a diminuir essas emissões alinhando-se aos objetivos globais de combate às mudanças climáticas.

Em sistemas de vedação, as justificativas estão relacionadas às suas propriedades únicas que o tornam especialmente indicado para esse fim específico. Os sistemas de vedação necessitam de materiais que combinem resistência mecânica com isolamento térmico e acústico e que sejam duráveis. O bioconcreto com resíduos de madeira atende essas exigências fornecendo uma solução sustentável e eficiente. Estudos recentes mostram que adicionar resíduos de madeira ao cimento pode melhorar bastante sua capacidade térmica. Isso resultaria em menos necessidade de sistemas de ar condicionado artificiais e consequentemente redução no consumo de energia em construções (Martinho, 2018). Essa vantagem ganha destaque em um cenário global onde eficiência energética e economia nas operações são prioridades importantes.

Segundo Martinho (2018), além das vantagens técnicas e ambientais, o uso de bioconcreto em sistemas de vedação também apresenta benefícios econômicos. A redução nos custos de matérias-primas decorrente da utilização de resíduos de madeira pode tornar o bioconcreto uma opção viável em grande escala. Além disso, os potenciais ganhos na eficiência da climatização, devido ao melhor desempenho térmico, podem resultar em economias consideráveis ao longo do ciclo de vida das construções. O bioconcreto é visto como uma alternativa promissora para o setor da construção civil devido à sua relevância crescente e à demanda por práticas mais sustentáveis na área.

As primeiras pesquisas sobre a utilização de resíduos de madeira no setor da construção civil remontam às décadas de 1970 e 1980. Durante esse período cientistas começaram a investigar se seria possível adicionar materiais orgânicos ao cimento. Inicialmente os estudos concentraram-se em substituir parcialmente os agregados tradicionais como areia e brita por resíduos de madeira com o intuito de reduzir o peso dos elementos constituídos de concreto e melhorar suas propriedades térmicas (Siddique *et al.*, 2008). Estes estudos pioneiros mostraram que apesar de algumas restrições como a diminuição da resistência mecânica, a inclusão de resíduos de madeira poderia proporcionar vantagens relevantes principalmente em usos que não exigem grande resistência estrutural.

Com o avanço das tecnologias de processamento e tratamento de resíduos em constante aprimoramento ao longo do tempo com o uso de resíduos de madeira no bioconcreto seguiu um desenvolvimento contínuo ao longo das décadas de 1990 até 2000 por pesquisadores que se dedicaram à melhoria da aderência entre as partículas de madeira e a matriz do cimento bem como à aplicação de métodos para tratar os resíduos visando reduzir seus impactos negativos na hidratação do material (Siddique *et al.*, 2008). Estes progressos possibilitaram que o bioconcreto atingisse características mecânicas e de durabilidade mais próximas às do concreto convencional, potencializando seu campo de aplicação.

Um dos marcos mais importantes na evolução do bioconcreto foi o avanço no desenvolvimento de fórmulas que mesclam resíduos de madeira com outros componentes como fibras naturais e substâncias químicas adicionais para aprimorar suas características. Por exemplo, o uso de fibras de celulose derivadas de resíduos de madeira tem sido extensivamente pesquisado por sua capacidade em melhorar a força à tração e a durabilidade do bioconcreto (Faruk *et al.*, 2012). Além disso, a utilização de aditivos como sílica ativa e metacaulim tem possibilitado compensar o declínio na resistência à

compressão ocasionado pela inclusão de resíduos orgânicos, tornando o bioconcreto uma alternativa viável para uma gama mais ampla de aplicações.

A utilização prática do bioconcreto com resíduos de madeira tem sido evidenciada em vários casos práticos e testes piloto. Um exemplo é a aplicação desse material em sistemas de isolamento em edifícios residenciais e comerciais, aproveitando suas qualidades térmicas e acústicas superiores para aprimorar a eficiência energética e o bem-estar dos ocupantes (Le *et al.*, 2023). Outra situação onde o bioconcreto é empregado é na construção de pavimentos mais leves, que se beneficiam da sua menor densidade e capacidade de isolamento térmico em relação aos materiais tradicionais. Essas aplicações práticas têm ajudado a comprovar a eficiência e sustentabilidade do bioconcreto como uma alternativa viável.

A evolução do bioconcreto com resíduos de madeira também tem sido impulsionada por avanços nas técnicas de caracterização e análise de materiais. A aplicação de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e outras técnicas de análise microestrutural tem possibilitado uma compreensão mais profunda das interações entre as sobras de madeira e a matriz à base de cimento, assim como dos mecanismos que afetam o desempenho do material (Pacheco-Torgal *et al.*, 2013). Estes progressos têm sido cruciais para o desenvolvimento de formulações mais eficiente para enfrentar dificuldades técnicas específicas como a decomposição da madeira ao longo do tempo.

Além disso, o uso de resíduos de madeira no bioconcreto está diretamente relacionado à classificação e às características desses materiais que variam dependendo da sua origem específica e composição química durante o processamento. Dentre os resíduos de madeira mais comuns estão a serragem, que pode ser dividida em pó de madeira e em fibras, também conhecida como lascas - cada um possuindo propriedades distintas que impactam no desempenho do bioconcreto (Silva *et al.*, 2021). Entender essas características é crucial para desenvolver bioconcretos com propriedades otimizadas que possam atender às exigências do setor da construção civil.

A serragem é um dos resíduos mais comuns na indústria da madeira e é frequentemente usada na produção de bioconcreto devido à sua disponibilidade e facilidade de incorporação. As partículas finas e uniformes da serragem permitem uma distribuição homogênea na matriz cimentícia do material e ajudam a reduzir sua densidade e aprimorar suas propriedades térmicas (Mendes *et al.*, 2021). No entanto, a serragem também apresenta desafios como a absorção de água que pode impactar a hidratação do cimento

e a resistência mecânica do bioconcreto. Portanto é crucial realizar tratamentos nos resíduos antes como a lavagem e secagem.

A fração mais fina (pó de madeira), é caracterizada por partículas menores que a serragem o que pode melhorar a compactação do bioconcreto e reduzir a formação de vazios. No entanto, sua alta área superficial pode aumentar a demanda por água na mistura, exigindo ajustes na dosagem do concreto (Fernandes *et al.*, 2020). O pó da madeira também contém quantidades substanciais tanto da lignina quanto da celulose que são compostos capazes de interferir no processo de hidratação do cimento utilizado na mistura. Pesquisas mais recentes têm se dedicado a analisar a utilização de métodos químicos alternativos como a alcalinização para reduzir esses impactos e aprimorar a ligação entre as partículas de madeira e o composto de cimento.

As fibras de madeira, também conhecidas como lascas, são amplamente valorizadas no bioconcreto por sua capacidade de reforço mecânico. Provenientes de processos de desfibramento, essas fibras apresentam alta resistência à tração e podem melhorar a tenacidade e a resistência à fissuração do bioconcreto (Faruk *et al.*, 2014). No entanto, sua incorporação requer cuidados especiais, como a dispersão uniforme na mistura e o tratamento para reduzir a absorção de água. Além disso, o comprimento e a espessura das fibras influenciam diretamente o desempenho do material, exigindo um controle rigoroso desses parâmetros durante a produção.

Embora as fibras, em maior granulometria, sejam menos comuns no bioconcreto, elas têm sido exploradas em aplicações específicas, como concretos leves para enchimento e isolamento térmico. A principal vantagem desses pedaços de madeira é a capacidade de reduzir consideravelmente a densidade do material utilizado – uma característica positiva em estruturas destinadas a suportar cargas mais leves (Zhang *et al.*, 2019). No entanto, o uso desse material pode afetar negativamente a resistência mecânica do bioconcreto, especialmente em aplicações estruturais. Por essa razão, seu emprego é habitualmente restrito a cenários em que a resistência não desempenha um papel crítico.

A tabela a seguir demonstra um compilamento desses estudos nos últimos anos, que fazem uso da inserção de serragem de madeira em conjunto com material cimentício afim de ter como objetivo um elemento com resultados positivos para ser um isolante térmico

Tabela 1 - Compilado de estudos e pesquisas com a utilização de serragem de madeira em matriz cimentícia

AUTOR (ES)	TÍTULO DO TRABALHO	ANO	OBJETIVO	CARACTERÍSTICAS DE DOSAGEM	PÓ OU LASCA	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (MPa)	MASSA ESPECÍFICA (kg/m³)
AGUIAR, A.	ESTABILIDADE TÉRMICA E REAÇÃO AO FOGO DO BIO-CONCRETO DE MADEIRA	2020	AVALIAR A ESTABILIDADE TÉRMICA DOS BCMS AO SE SUBMETER OS MESMOS A TEMPERATURAS QUE VARIARAM DE 22 °C ATÉ 250 °C, BEM COMO AVALIAR SUAS PROPRIEDADES DE REAÇÃO AO FOGO.	- 40% de cimento; - 30% de metacaulinita; - 30% de cinza volante; - 3% de cloreto de cálcio (em relação à massa dos materiais cimentícios); -Relação água/cimento: 0,35	PÓ	40% 8,18 50% 2,48 60% 0,53	40% 1110,00 50% 850,00 60% 630,00
BEDERINA <i>ET AL.</i>	EFFECT OF THE ADDITION OF WOOD SHAVINGS ON THERMAL CONDUCTIVITY OF SAND CONCRETE	2007	AVALIAR A CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE CONCRETO COM SERRAGEM	1:1,5:2	PÓ	1,5 - 3,0	800 - 1000
BILCATI, G. K.; LENGOWS KI, E. C.; JUMES, J. J.; ANDRADE	COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS LEVES REFORÇADOS COM SERRAGEM DE PINUS SPP	2021	INVESTIGAR O USO DE SERRAGEM DE PINUS SPP. COMO AGREGADO EM ARGAMASSAS E CONCRETOS	10%, 15% e 20% de serragem	PÓ	Não informado	Não informado

, F. H.; NERVIS, I. R.; SOUZA, I. S. C.; LANGARO , E.			PARA PRODUZIR COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS LEVES.				
CALVANI, C.	APROVEITAME NTO DO PÓ DE SERRA NO CONCRETO: AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS	2018	AVALIAR AS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DO CONCRETO, COM A SUBSTITUIÇÃO DA AREIA, PELO RESÍDUO VEGETAL DA MADEIRA COM E SEM TRATAMENTO, IDENTIFICANDO QUAL A MELHOR APLICAÇÃO DO RESÍDUO PARA OS ENSAIOS MECÂNICOS	OS TRAÇOS DE CONCRETO FORAM FORMULADOS COM A SUBSTITUIÇÃO DO AGREGADO MIÚDO (AREIA) POR 10%, 20% E 30% DE PÓ DE SERRA, UTILIZANDO O CIMENTO CP II-F 32	PÓ	TRAÇO BASE (SEM RESÍDUO): 39,85 TRAÇO COM 10% DE PÓ DE SERRA (SEM TRATAMENTO): 32,51 TRAÇO COM 10% DE PÓ DE SERRA (COM TRATAMENTO): 30,90	PÓ DE SERRA SEM TRATAMENTO: 1270 PÓ DE SERRA COM TRATAMENTO: 1250
CASTRO, V.; AZAMBUJ A, R.; PACHEN, C.; IWAKIRI, S.	ALTERNATIVE VIBRO- DYNAMIC COMPRESSION PROCESSING OF WOOD-CEMENT COMPOSITES USING AMAZONIAN WOOD	2019	AVALIAR O USO DE MADEIRA DE QUATRO ESPÉCIES AMAZÔNICAS (ESCHWEILERA CORIACEAE, SWARTZIA RECURVA, MANILKARA	1:2,75	PÓ	SUPERIOR A 10	1060-1230

			AMAZONICA E POUTERIA GUIANENSIS) NA PRODUÇÃO DE COMPÓSITOS DE MADEIRA- CIMENTO (WCC) PELO PROCESSO DE COMPACTAÇÃO VIBRO- DINÂMICA, UM MÉTODO ALTERNATIVO QUE DISPENSA O USO DE PRENSAS HIDRÁULICAS.				
DA GLORIA, M.	DESENVOLVIME NTO E CARACTERIZAÇ ÃO DE PAINÉIS SANDUÍCHES DE CONCRETO COM NUCLEO LEVE E FACES EM LAMINADOS REFORÇADOS COM FIBRAS LONGAS DE SISAL	2015	DESENVOLVER PAINÉIS SANDUÍCHES AUTOPORTANTES DE MATERIAIS LIGNO- CELULÓSICOS PARA ALVENARIA DE EDIFÍCIOS.	BCM40: 1 : 0.75 : 0.75 : 0.82 : 0.09 : 0.66 : 0.87 BCM50: 1 : 0.75 : 0.75 : 1.23 : 0.09 : 0.98 : 0.87 BCM60: 1 : 0.75 : 0.75 : 1.84 : 0.09 : 1.47 : 0.87 BCM70: 1 : 0.75 : 0.75 : 2.87 : 0.09 : 2.43 : 0.87	LASCA	CCM 0,5: 0,44 CCM 1: 1,22 MPa CCM 2: 3,55 variação). 2,25: 6,44 MPa CCM 2,5: 9,46 MPa CCM 3: 15,97 MPa	CCM 0,5 700 CCM 1 820 CCM 2 950 CCM 2,25 1000 CCM 2,5 1100 CCM 3 1250

DA GLORIA, M.	COMPORTAMENTO EXPERIMENTAL E NUMERICO DE BIOCONCRETOS DE MADEIRA E DE PAINEIS SANDUÍCHES COM FACES EM LAMINADOS REFORÇADOS COM FIBRAS LONGAS DE SISAL	2020	CARACTERIZAR E MODELAR OS ELEMENTOS COMPONENTES DE UM SISTEMA SANDUÍCHE FORMADO POR UM NÚCLEO EM BIOCONCRETO, E FACES EM COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS REFORÇADOS POR FIBRAS LONGAS DE SISAL.	BCM40-0,35: 1:0,9:1:1,33:1,17:0,72:0,10 BCM40-0,40: 1:0,97:1:1,33:1,17:0,77:0,10 BCM40-0,45: 1:1,03:1:1,33:1,50:0,82:0,11 BCM40-0,35: 1:1,11:1:1,33:0,89:0,10	LASCA	a/c 0,40 a/c 0,45 a/c 0,50 BCM40 1010,28 (1,77) 974,50 (2,08) 946,63 (3,25) BCM45 956,98 (0,83) 945,09 (0,96) 920,98 (2,01) BCM50 904,65 (1,64) 871,53 (0,82) 860,80 (0,94)	a/mc 0,35 a/mc 0,40 a/mc 0,45 BCM40 12,27 (2,14) 5,87 (1,24) 3,15 (5,36) BCM45 6,80 (4,30) 2,78 (4,17) 2,13 (1,59) BCM50 3,39 (1,94) 1,92 (3,97) 1,15 (1,62)
GUO, H. <i>ET AL.</i>	PROPERTIES OF LIGHT CEMENTITIOUS COMPOSITE MATERIALS WITH WASTE WOOD CHIPS	2022	COMPARAR TRÊS TIPOS DE LIGANTES E CINCO RAZÕES MASSA DE CAVACOS DE MADEIRA/LIGANTE, AVALIANDO PROPRIEDADES TÉRMICAS E MECÂNICAS DOS	1/10 a 1/2	LASCA	Não informado	150 a 240

			COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS.				
GARCEZ, M. R. <i>ET AL.</i>	TIJOLOS LEVES PARA ALVENARIA PRODUZIDOS A PARTIR DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA MADEIREIRA	2018	AVALIAR O EFEITO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AREIA POR SERRAGEM NAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE COMPÓSITOS CIMENTO-MADEIRA.	Variação de 13,69% a 35,61% de serragem	PÓ	Não informado	REDUÇÃO NA MASSA ESPECÍFICA APARENTE COM O AUMENTO DA SERRAGEM
GARCEZ, M.; SANTOS, T.; GATTO, D.	AValiação DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE CONCRETOS PRÉ-MOLDADOS COM ADIÇÃO DE SERRAGEM EM SUBSTITUIÇÃO AO AGREGADO MIÚDO	2013	ANALISAR A POSSIBILIDADE DE UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE BASE MADEIREIRA COMO UMA NOVA ALTERNATIVA DE MATERIAL PARA A INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO.	T1 (0%) 1 23,8% 0% 28,6% T2 (25%) 1 17,85% 11,9% 28,6% T3 (50%) 1 11,9% 23,8% 28,6% T4 (75%) 1 5,95% 35,7% 28,6% T5 (100%) 1 0% 47,6% 28,6%	PÓ	17,84-4,11	2100-1320

K. AL RIM, A. LEDHEM, O. DOUZANE, R.M. DHEILLY, M. QUENEUD EC	INFLUENCE OF THE PROPORTION OF WOOD ON THE THERMAL AND MECHANICAL PERFORMANCE S OF CLAY- CEMENT-WOOD COMPOSITES	1999	VERIFICAR A INFLUÊNCIA QUE OS AGREGADOS DE MADEIRA TÊM NO DESEMPENHO TÉRMICO E MECÂNICO DE UM COMPÓSITO ARGILA- CIMENTO- MADEIRA	1/5,1/7,1/8 e 1/10	PÓ	Não informado	0% 1170,00 10% 1010,00 20% 870,00 30% 700,00 40% 490,00 50% 370,00
KHEDARI <i>ET AL.</i>	NEW LIGHTWEIGHT COMPOSITE CONSTRUCTION MATERIALS WITH LOW THERMAL CONDUCTIVITY	2001	DESENVOLVER MATERIAIS LEVES COM BAIXA CONDUTIVIDADE TÉRMICA	1:5 (cimento:serragem)	PÓ	1800-3500	850-1050
MAEDER, M.; ZWICKY, D.	Multi-functional features of pourable wood- cement compounds – mechanical, building-physical, economic and ecological performance	2016	EXAMINAR E AVALIAR AINDA O POTENCIAL ECONÓMICO E ECOLÓGICO DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS BASEADOS NOS COMPÓSITOS DE MADEIRA- CIMENTO E DISCUTIR OS	1:1:3	PÓ	Mix 1: 46.04 Mix 2: 26.20 Mix 3: 15.82 Mix 4: 12.44 Mix 5: 10.88	Mix 1: 2177.5 Mix 2: 1978.8 Mix 3: 1762.1 Mix 4: 1712.0 Mix 5: 1565.9

			POTENCIAIS DESAFIOS NA UTILIZAÇÃO ESTRUTURAL DOS CMI.				
MARTINH O, P.A.G.	ANÁLISE DO COMPORTAMEN TO DE ARGAMASSAS COM A INCORPORAÇÃ O DE “PELLETS” DE MADEIRA	2017	CONTRIBUIR PARA UM MAIOR CONHECIMENTO DA COMUNIDADE CIENTÍFICA E DA INDÚSTRIA SOBRE ARGAMASSAS DE CIMENTO COM A INCORPORAÇÃO DE WOOD PELLETS E O EFEITO DA UTILIZAÇÃO DESTES NO DESEMPENHO DE ARGAMASSAS.	1:1:3	LASCA	Mix 1 46,04 Mix 2 26,20 Mix 3 15,82 Mix 4 12,44 Mix 5 10,88	Mix 12062,76 Mix 2 1792,67 Mix 3 1544,39 Mix 4 1477,39 Mix 5 1363,14
MOREIRA, A.	INFLUÊNCIA DA APLICAÇÃO DO RESÍDUO DE MADEIRA NA COMPOSIÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO PARA ALVENARIA DE VEDAÇÃO	2008	VERIFICAR A POTENCIALIDAD E DO RESÍDUO DE MADEIRA COMO ALTERNATIVA PARA SUA REUTILIZAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL A PARTIR DE UM COMPÓSITO DE MATRIZ	1:5, 1:7, 1:8 e 1:10	PÓ	5% - 1,39Mpa 10% - 2,24Mpa 15% - 1,72Mpa	1133,00

			CIMENTANTE, PARA FORMAÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETO SEM FUNÇÃO ESTRUTURAL PARA ALVENARIA DE VEDAÇÃO.				
MISSAGIA, Z. M. V.; SANTOS, J. C.; PANZERA, T. H.; BRANDÃO , L. C.; SILVA, D. A. L.; CHRISTOF ORO, A. L.	MATERIAIS COMPÓSITOS PARTICULADOS EM MATRIZ EPÓXI REFORÇADOS COM SERRAGEM, CIMENTO E SILICATO DE MAGNÉSIO	2013	INVESTIGAR PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE COMPÓSITOS PARTICULADOS EM MATRIZ EPÓXI REFORÇADOS COM SERRAGEM DE MADEIRA, CIMENTO PORTLAND E SILICATO DE MAGNÉSIO.	30% DE SERRAGEM	PÓ	Não informado	Não informado

SILVA, A. J. ET AL.	ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ARGAMASSA COM INSERÇÃO DE RESÍDUOS DE MADEIRA.	2021	ANALISAR AS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ARGAMASSA COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO AGREGADO MIÚDO POR RESÍDUO DE MADEIRA.	1:5 (CIMENTO: AREIA) POR MASSA, COM RESÍDUO DE MADEIRA SUBSTITUINDO 0%, 2,5%, 5% E 10% DA AREIA POR VOLUME.	PÓ	AREF (CONTROLE): 11,30 ARM 2,5%: 10,50 ARM 5%: 11,90 ARM10%: 9,94	AREF (CONTROLE): 2460 ARM 2,5%: 2440 ARM 5%: 2380 ARM10%: 2360
VIEZZER, M. R. Z.	UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO MADEIREIRO AMAZÔNICO NA PRODUÇÃO DE BLOCOS DE VEDAÇÃO PARA CONSTRUÇÃO CIVIL	2022	DESENVOLVER UM MATERIAL DE UM BLOCO DE CIMENTO- SERRAGEM COMO UM MATERIAL ALTERNATIVO PARA CONSTRUÇÃO CIVIL, APLICANDO RESÍDUO MADEIREIRO DE ESPÉCIES FLORESTAIS NATIVAS DA REGIÃO AMAZÔNICA, AVALIANDO O USO PARA	1:4	PÓ	3,62	760-580

			CONSTRUÇÃO CIVIL CONSIDERANDO A RESISTÊNCIA E O DESEMPENHO TÉRMICO NO MUNICÍPIO DE ALTA FLORESTA- MT.				
--	--	--	---	--	--	--	--

Fonte: O autor

A Tabela 1 demonstra que o emprego de resíduos de madeira como o pó de serragem tem sido amplamente adotado como principal estratégia para integração de materiais lignocelulósicos em composições cimentícias. É notável que nos diferentes estudos realizados a preferência pelo uso do pó em vez de lascas está relacionada com uma série de benefícios técnicos e operacionais que se refletem tanto nos resultados experimentais quanto nas análises teóricas dos pesquisadores. Por exemplo: pesquisas que empregaram serragem em pó apontam para uma notável queda na densidade e consequente redução do peso do compósito sem que isso resultasse necessariamente em uma redução das propriedades.

Aguiar (2020) destaca que ao utilizar diferentes porcentagens de pó de serragem - variando de 40% a 60% observa-se uma diminuição gradual da resistência à compressão variando de 8,18 MPa para uma composição com 40% de serragem, para 0,53 MPa quando a proporção atinge 60%. No entanto essa redução de resistência pode ser vista como benéfica em contextos onde leveza e isolamento térmico são desejáveis.

O mesmo comportamento é observado no estudo de Moreira (2008), no qual a inserção de 5% a 15% de pó de serragem resultou em resistência à compressão variando entre 2,24 Mpa e 1,39. No entanto, essa redução na resistência pode ser um fator aceitável para aplicações não estruturais, como em blocos de vedação, onde o desempenho térmico e a leveza são mais relevantes do que a resistência mecânica.

De maneira semelhante, Calvani (2018), em sua pesquisa, analisa comparativamente os blocos de construção produzidos com a substituição parcial de areia por pó de serra. Ele observou que, embora haja uma redução na resistência mecânica à medida que a quantidade de resíduos aumenta, o tratamento prévio do pó pode minimizar os impactos negativos. Isso destaca a necessidade de otimizar as etapas de preparação dos materiais visando alcançar um equilíbrio adequado entre peso, leveza e desempenho estrutural.

Em contrapartida, estudos que empregaram lascas de madeira revelam desafios relacionados à uniformidade e aderência entre os resíduos e a pasta de cimento. Devido às dimensões maiores e à superfície menos reativa das lascas em comparação com o pó resultante da trituração da madeira, há uma tendência para uma distribuição menos consistente no compósito formado, o que pode levar a áreas de fragilidade e comprometer, em certos casos, a resistência mecânica do material. A discrepância no comportamento é parcialmente explicada pela granulometria dos resíduos. A serragem finamente moída possui uma textura que possibilita uma distribuição mais uniforme e interações mais

profundas com os compostos resultantes da reação química do cimento durante sua hidratação. Isso resulta em um sistema mais coeso e com um desempenho mais estável e previsível.

Em comparação com pesquisas que empregaram as lascas de madeira conforme, Guo *et al.*, (2022) e Martinho (2017), nota-se que esse tipo de resíduo é menos utilizado devido à complexidade de incorporação do material na mistura de cimento.

As aparências das lascas têm uma forma irregular e dimensões maiores que dificultam a distribuição homogênea na mistura e podem resultar em espaços vazios que comprometem a coesão do compósito. Além disso, a superfície menos porosa das lascas reduz a aderência ao cimento, impactando negativamente a resistência final. De acordo com Guo *et al.*, (2022) os compósitos com lascas de madeira têm uma densidade muito baixa (150 - 240 kg/m³), o que indica alta porosidade e, conseqüentemente, menor resistência mecânica.

Por outro lado, Calvani (2018) e Garcez *et al.*, (2018), destacam os benefícios do uso de pó de serragem em substituição à areia como agregado miúdo. A substituição parcial de 10% a 30% resultou em uma resistência à compressão de 32,51 MPa para 10% de substituição, demonstrando que, em certos níveis, o pó pode ser incluído sem comprometer significativamente a resistência mecânica. Além disso há uma diminuição significativa na densidade e uma melhoria na capacidade de isolamento térmico - características valorizadas em produtos como tijolos leves e painéis de cimento.

Além dos aspectos técnicos envolvidos nessa questão específica do uso de pó de serragem em compósitos cimentícios, seria relevante considerar também fatores como sua ampla acessibilidade e o seu potencial para ser utilizado de forma eficiente pela indústria. Os resíduos industriais comuns gerados em largas quantidades pelas operações das indústrias madeireiras e de beneficiamento da madeira fazem com que sua utilização nesses materiais não seja apenas uma opção economicamente vantajosa, mas também uma prática ecologicamente responsável que contribui para diminuir o volume de resíduos e reduzir os impactos negativos no meio ambiente.

Assim sendo, as informações comparativas indicam que a inclusão de resíduos de madeira – seja em forma de pó ou lascas – traz benefícios em termos de leveza e propriedades térmicas dos compósitos. No entanto, o uso do pó se destaca por vantagens claras, como

facilidade no processamento, uniformidade na distribuição das partículas e a capacidade de otimizar tratamentos superficiais para melhorar a aderência com a matriz cimentícia.

Essa abordagem está em sintonia com as tendências atuais no setor da construção civil, que buscam criar materiais inovadores que combinem desempenho técnico com responsabilidade ambiental. Resumindo, a reflexão resultante da análise dos dados disponíveis destaca que utilizar pó de serragem na formulação de compósitos cimentícios é uma escolha válida tanto pelas propriedades naturais do material, que favorecem a melhor integração e aproveitamento dos resíduos, quanto pelos benefícios práticos e ambientais decorrentes de sua aplicação. Isso representa, assim, uma perspectiva promissora para o desenvolvimento de materiais mais leves, eficientes e sustentáveis na construção.

Guo *et al.*, (2022) indicam que apesar dos obstáculos na padronização dos compósitos com lascas, eles têm uma baixa densidade que pode ser benéfica para aplicações que necessitam de materiais leves como painéis isolantes e sistemas construtivos sustentáveis. Logo, se forem tratados adequadamente por meio de processos de compatibilização química ou técnicas de compactação específicas as lascas podem otimizar tanto o desempenho mecânico quanto térmico dos materiais à base de cimento.

Um aspecto a considerar é a capacidade de misturar lascas e pó de serragem em diversas proporções para aprimorar as características dos compósitos. Comparar estudos entre esses dois tipos de resíduos pode ajudar a determinar as proporções e os tratamentos mais adequados para potencializar o desempenho estrutural e térmico, ampliando as possibilidades de aplicação dos materiais criados.

Por fim, a importância de diversificar e trazer novidades ao aproveitamento de resíduos de madeira justifica a exploração de lascas como uma alternativa viável na indústria da construção civil. A criação de métodos eficientes para integrá-las em misturas com cimento pode expandir as opções de materiais sustentáveis no setor, diminuindo a dependência de agregados tradicionais e incentivando maior sustentabilidade na produção de madeira.

2.2.3. Propriedades Físicas do Bioconcreto com Resíduo de Madeira

A densidade do bioconcreto é uma das propriedades afetadas pela inclusão de resíduos de madeira. Quando há a substituição parcial dos agregados convencionais como areia e brita

por materiais orgânicos mais leves no bioconcreto ocorrerá um decréscimo considerável na densidade do material. Pesquisas têm demonstrado que a densidade do bioconcreto pode variar entre 1200 e 1800 kg/m³ conforme o tipo e a quantidade de resíduos de madeira empregados (Mendes *et al.*, 2021). A diminuição da densidade não só tornará mais fácil lidar e aplicar o material como também ajudará a reduzir o peso das estruturas, o que pode ser especialmente benéfico em arranha-céus ou em situações onde a carga é uma preocupação.

A absorção de água é outra propriedade física crítica no bioconcreto com resíduos de madeira. Os resíduos orgânicos tendem a ser mais higroscópicos do que os agregados convencionais, o que pode aumentar a porosidade do material e, conseqüentemente, sua capacidade de absorver água (Fernandes *et al.*, 2020). Essa característica pode ser tanto uma vantagem quanto uma desvantagem, dependendo da aplicação. Por um lado, a maior porosidade pode melhorar o isolamento térmico e acústico do bioconcreto. Por outro, a absorção excessiva de água pode comprometer a durabilidade do material, especialmente em ambientes úmidos ou expostos a intempéries. Por isso, o tratamento prévio dos resíduos de madeira e a utilização de aditivos hidrofóbicos são estratégias essenciais para controlar essa propriedade.

A análise microestrutural do bioconcreto contendo resíduos de madeira revelam uma morfologia complexamente formada pela presença de poros e interfaces entre as partículas de madeira e a base cimentícia subjacente. A técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) tem sido extensivamente empregada na investigação dessa estrutura em pequena escala, permitindo a identificação dos padrões de distribuição dos poros e a avaliação da aderência entre os componentes do composto (Pacheco-Torgal *et al.*, 2013). Estudos recentes mostraram que a interação entre os resíduos de madeira e o cimento é essencial para o funcionamento adequado do bioconcreto, afetando características como resistência física e durabilidade.

As propriedades de retração e expansão do bioconcreto são diretamente influenciadas pela presença de resíduos de madeira. A retração durante o processo de secagem do material pode ser ampliada pela existência de materiais orgânicos que absorvem e liberam água de forma mais intensiva do que os agregados convencionais (Kumar *et al.*, 2018). Já a expansão pode ocorrer em resposta às mudanças na umidade e temperatura e também é afetada pela natureza hidróscópica dos resíduos de madeira. É importante manter essas

características sob controle para prevenir fissuras e danos ao bioconcreto em ambientes externos.

No que se refere à durabilidade, importante conhecer o comportamento do bioconcreto com resíduos de madeira, principalmente para sua aplicação em ambientes. Conforme mencionado por Zhang *et al.*, (2023), os resíduos orgânicos naturalmente sofrem degradação biológica e química ao longo do tempo, o que pode afetar a durabilidade do material. Para minimizar esses efeitos adversos têm sido estudadas técnicas como tratamento químico dos resíduos e adição de aditivos protetores. Além disso é possível aumentar a durabilidade do bioconcreto ao optar por madeiras mais robustas contra a degradação como o pinho ou o Eucalipto.

Logo, as propriedades físicas do bioconcreto com resíduos de madeira são influenciadas por uma complexa interação entre a matriz cimentícia e os materiais orgânicos. A redução da densidade, a maior porosidade e a excelente capacidade de isolamento térmico são características que tornam o bioconcreto uma alternativa atraente para a construção civil. No entanto, desafios como a absorção de água e a retração exigem atenção especial durante a formulação e aplicação do material.

2.2.4. Propriedades Mecânicas do Bioconcreto com Resíduo de Madeira

A inclusão de materiais orgânicos na mistura de cimento gera mudanças no desempenho mecânico do material e afeta sua resistência à compressão, e tração e sua capacidade de flexão e durabilidade (Silva *et al.*, 2021).

Uma das propriedades mecânicas mais importantes para o concreto é a resistência à compressão, e enfrentar a redução desta propriedade é um dos grandes desafios ao incorporar resíduos de madeira no material. Estudos mostram que a resistência à compressão do bioconcreto pode ser cerca de 30% inferior à do concreto tradicional com base no tipo e na quantidade de resíduos utilizados (Silva *et al.*, 2021). A diminuição mencionada ocorre devido à menor compactação e à maior porosidade do material utilizado e também devido às interfaces formadas entre as partículas de madeira e o cimento utilizado como base. Essas interfaces podem funcionar como pontos frágeis no material. Entretanto, adições como sílica ativa e metacaulim têm possibilitado, em parte, compensar essa redução na resistência estrutural do bioconcreto tornando-o uma opção viável para aplicações em que alta resistência não é essencial.

As propriedades de resistência à tração e flexão do bioconcreto também podem ser afetadas pela presença de resíduos de madeira. Enquanto o concreto tradicional é geralmente reconhecido por sua baixa resistência à tração, a inclusão de fibras de madeira pode melhorá-la consideravelmente. Essas fibras atuam como reforço ao distribuir as tensões no material e aumentam sua tenacidade para evitar a propagação de fissuras (Faruk *et al.*, 2010). Esses atributos são especialmente úteis em contextos como pisos e estruturas de vedação onde é fundamental garantir que o material seja resistente à formação de fissuras para garantir sua durabilidade.

A elasticidade e a deformação são características que indicam a habilidade do bioconcreto de resistir a esforços sem sofrer danos permanentes. A presença de resíduos de madeira tende a aumentar a flexibilidade do material - o que pode ser benéfico em situações que demandam adaptabilidade como em estruturas sujeitas a cargas dinâmicas ou vibrações (Zhang *et al.*, 2023). No entanto, essa maior capacidade de se deformar também pode representar uma desvantagem em aplicações que requerem rigidez e pode exigir ajustes na composição do bioconcreto para atender requisitos específicos.

A comparação entre o bioconcreto com resíduos de madeira e o concreto convencional revela compensações entre propriedades mecânicas e benefícios ambientais. Embora o bioconcreto geralmente apresente menor resistência mecânica, suas vantagens em termos de sustentabilidade, isolamento térmico e redução de peso o tornam uma alternativa atraente para aplicações específicas (Pacheco-Torgal *et al.*, 2013). Além disso, o desenvolvimento de formulações otimizadas e o uso de técnicas de reforço, como a incorporação de fibras sintéticas ou naturais, têm permitido superar algumas das limitações mecânicas do material.

O estudo do envelhecimento e da degradação dos resíduos de madeira no bioconcreto é uma área de pesquisa em constante evolução. Ensaio acelerados de envelhecimento, como exposição a ciclos de umidade e secagem, têm sido utilizados para avaliar a durabilidade do material e identificar mecanismos de degradação (Calvani *et al.*, 2018). Esses estudos são essenciais para o desenvolvimento de bioconcretos mais duráveis e para a definição de diretrizes para sua aplicação em diferentes condições ambientais.

2.2.5. Propriedades Térmicas e Isolamento

As propriedades térmicas do bioconcreto com resíduos de madeira são uma de suas características mais promissoras, especialmente no contexto da eficiência energética em edificações. A incorporação de resíduos orgânicos na matriz cimentícia resulta em um material com baixa condutividade térmica, o que o torna ideal para aplicações em sistemas de vedação e isolamento (Viezzler, 2022).

Segundo Viezzler (2022) a capacidade de isolamento térmico do bioconcreto é diretamente influenciada pela presença de partículas de madeira, que criam uma estrutura porosa no interior do material. Essa porosidade reduz a transferência de calor, resultando em um coeficiente de condutividade térmica significativamente menor do que o do concreto convencional. Em sua pesquisa, os experimentos indicam que o coeficiente de condutividade térmica do bioconcreto pode variar entre 0,1 e 0,3 W/m·K, dependendo da formulação e do tipo de resíduo utilizado. Essa propriedade é particularmente vantajosa em climas extremos, onde o controle térmico é essencial para o conforto dos ocupantes e a redução do consumo de energia. Sua baixa condutividade térmica permite a redução da transferência de calor entre o interior e o exterior das edificações, diminuindo a necessidade de sistemas de climatização artificial (Zhang *et al.*, 2021). Em climas quentes, o bioconcreto pode ajudar a manter o interior dos edifícios mais fresco, reduzindo o uso de ar-condicionado. Já em climas frios, o material contribui para a retenção de calor, diminuindo a demanda por aquecimento. Essa dupla funcionalidade torna o bioconcreto uma solução versátil para a construção sustentável.

A comparação do desempenho térmico do bioconcreto com outros materiais de vedação, como tijolos convencionais e blocos de concreto, revela vantagens significativas. Enquanto materiais tradicionais apresentam coeficientes de condutividade térmica na faixa de 0,5 a 1,5 W/m·K, o bioconcreto com resíduos de madeira oferece um desempenho superior, com valores próximos aos de materiais isolantes específicos, como lã de rocha e poliestireno expandido (Guo *et al.*, 2022). Essa característica posiciona o bioconcreto como uma alternativa viável para a construção de edifícios de baixo consumo energético.

O potencial para redução de custos com climatização é um dos aspectos mais atraentes do bioconcreto. A melhoria no isolamento térmico proporcionada pelo material pode resultar em economias significativas ao longo do ciclo de vida das edificações. Estudos

estimam que a utilização de bioconcreto em sistemas de vedação pode reduzir o consumo de energia para climatização em até 30%, dependendo das condições climáticas e do projeto do edifício (Viezzler, 2022). Essa redução não apenas beneficia o meio ambiente, mas também representa uma vantagem econômica para proprietários e usuários.

O desempenho térmico do bioconcreto também pode ser avaliado em diferentes condições climáticas, demonstrando sua adaptabilidade a uma variedade de contextos. Em regiões tropicais, onde a alta umidade e as temperaturas elevadas são desafios constantes, o bioconcreto tem se mostrado eficaz na manutenção de ambientes internos confortáveis (Pacheco-Torgal *et al.*, 2013). Já em climas temperados, o material contribui para a estabilização térmica, reduzindo as flutuações de temperatura e melhorando o conforto dos ocupantes. Essa versatilidade reforça o potencial do bioconcreto como uma solução global para a construção sustentável.

Frente ao exposto, as propriedades térmicas do bioconcreto com resíduos de madeira o tornam um material altamente eficiente para o isolamento térmico de edificações.

2.2.6. Compatibilidade e Interação Entre a Madeira e a Matriz de Concreto

A compatibilidade e a interação entre os resíduos de madeira e a matriz de concreto são aspectos fundamentais para o desempenho do bioconcreto. A adesão entre as partículas de madeira e a matriz cimentícia, bem como os possíveis efeitos adversos da madeira na alcalinidade do concreto, são fatores que influenciam diretamente a durabilidade e as propriedades mecânicas do material (Silva *et al.*, 2021).

A superfície hidrofóbica da madeira dificulta a ligação com a matriz hidrofílica do concreto, resultando em interfaces frágeis que podem comprometer a resistência mecânica do material (Da Gloria, 2020). Para superar esse desafio, técnicas como a alcalinização e a aplicação de revestimentos hidrofílicos têm sido amplamente investigadas. Esses tratamentos modificam a superfície das partículas de madeira, melhorando sua afinidade com a matriz cimentícia e, conseqüentemente, a adesão entre os componentes.

Os possíveis efeitos adversos da madeira na alcalinidade do concreto também são uma preocupação importante. Segundo, Da Gloria (2020) a madeira contém compostos orgânicos, como lignina e celulose, que podem interferir na hidratação do cimento e na formação de fases cristalinas, como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Essa

interferência pode resultar em uma redução na resistência mecânica e na durabilidade do bioconcreto. Para mitigar esses efeitos, pesquisadores têm explorado o uso de aditivos químicos, como sílica ativa e metacaulim, que podem compensar a perda de alcalinidade e melhorar a hidratação do cimento.

As técnicas de tratamento para melhorar a aderência e a durabilidade dos resíduos de madeira são uma área de pesquisa em constante evolução. Além da alcalinização, métodos como a carbonização e a modificação química com agentes acoplantes têm sido utilizados para aumentar a compatibilidade entre a madeira e a matriz cimentícia (Da Gloria, 2015). A carbonização, por exemplo, transforma a madeira em um material mais estável e menos higroscópico, reduzindo sua absorção de água e melhorando sua adesão ao concreto. Já os agentes acoplantes, como silanos, criam pontes químicas entre a madeira e a matriz, aumentando a resistência da interface.

Os efeitos da lignina, celulose e outros compostos da madeira na hidratação do cimento são complexos e multifacetados. A lignina, por exemplo, pode retardar a hidratação do cimento devido à sua natureza hidrofóbica, enquanto a celulose pode atuar como um reforço mecânico, aumentando a tenacidade do material (Da Gloria, 2015). A compreensão desses efeitos é essencial para a formulação de bioconcretos com propriedades otimizadas. Estudos recentes têm utilizado técnicas avançadas de caracterização, como microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de infravermelho (FTIR), para analisar as interações químicas e físicas entre a madeira e a matriz cimentícia.

A influência do tipo de madeira na compatibilidade com a matriz de concreto também é um fator crítico. Madeiras mais densas, como o eucalipto e o pinho, tendem a apresentar melhor desempenho devido à sua menor absorção de água e maior resistência mecânica (Silva *et al.*, 2021). Por outro lado, madeiras menos densas podem exigir tratamentos adicionais para garantir a compatibilidade com a matriz cimentícia.

2.2.7. Impactos ambientais e as potencialidades do bioconcreto no mercado da construção civil

A redução de resíduos sólidos é uma das principais vantagens ambientais do bioconcreto com resíduos de madeira. A indústria madeireira gera uma quantidade significativa de resíduos, como serragem, pó de madeira e fibras, que tradicionalmente são descartados

em aterros ou incinerados, contribuindo para a poluição ambiental (Guimarães *et al.*, 2024). A incorporação desses resíduos no bioconcreto não apenas evita seu descarte inadequado, mas também transforma um problema ambiental em uma solução sustentável. Essa prática alinha-se aos princípios da economia circular, onde resíduos são reinseridos no ciclo produtivo, reduzindo a demanda por recursos naturais. Com isso, a sustentabilidade se torna um potencial atrelada a redução desses resíduos no desenvolvimento do bioconcreto com serragem, posicionando-o como uma alternativa viável para reduzir o impacto ambiental da construção civil. A utilização de resíduos de madeira na produção de bioconcreto não apenas promove a economia circular, mas também contribui para a redução da pegada de carbono e a diminuição de resíduos sólidos (Silva *et al.*, 2021).

O potencial para a diminuição da pegada de carbono é outro benefício significativo do bioconcreto. A produção de cimento, um dos principais componentes do concreto, é responsável por aproximadamente 8% das emissões globais de CO₂ (World Green Building Council, 2019). A substituição parcial de cimento por resíduos de madeira no bioconcreto pode reduzir significativamente essas emissões, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. Além disso, a utilização de resíduos de madeira como substitutos de agregados convencionais, como areia e brita, também reduz a necessidade de extração desses recursos, diminuindo o impacto ambiental associado à mineração.

A análise do ciclo de vida do bioconcreto revela benefícios ambientais significativos em comparação com o concreto convencional. Estudos indicam que o bioconcreto com resíduos de madeira apresenta uma pegada de carbono até 30% menor, dependendo da formulação e do tipo de resíduo utilizado (Guimarães *et al.*, 2024). Além disso, o material contribui para a redução do consumo de energia ao longo do ciclo de vida das edificações, graças às suas propriedades térmicas superiores. Essa redução no consumo de energia não apenas beneficia o meio ambiente, mas também resulta em economias significativas para os usuários.

A análise de custo-benefício ambiental do bioconcreto em aplicações práticas também é favorável. Embora o custo inicial do bioconcreto possa ser superior ao do concreto convencional, devido aos tratamentos necessários para os resíduos de madeira, os benefícios ambientais e econômicos ao longo do ciclo de vida do material compensam esse investimento (Le *et al.*, 2023). Por exemplo, a redução no consumo de energia para climatização e a maior durabilidade do material podem resultar em economias

significativas ao longo dos anos. Além disso, a valorização de resíduos como matéria-prima pode reduzir os custos de produção, tornando o bioconcreto uma alternativa economicamente viável.

Os desafios ambientais associados ao bioconcreto também devem ser considerados. A degradação dos resíduos de madeira ao longo do tempo pode resultar na liberação de compostos orgânicos que podem afetar a qualidade do solo e da água (Zhang, 2021). Além disso, a produção de bioconcreto em larga escala pode exigir o uso de aditivos químicos e tratamentos que podem ter impactos ambientais negativos. Por isso, é essencial adotar práticas sustentáveis em todas as etapas da produção e utilização do bioconcreto, desde a seleção dos resíduos até a disposição final do material.

Para tal, o bioconcreto com resíduos de madeira representa uma solução sustentável para a construção civil, com benefícios significativos em termos de redução de resíduos sólidos, diminuição da pegada de carbono e eficiência energética.

O bioconcreto com resíduos de madeira tem ganhado destaque no mercado da construção civil devido às suas propriedades únicas e benefícios ambientais. Sua aplicação prática abrange desde sistemas de vedação até pavimentos leves, oferecendo uma solução sustentável e eficiente para diversas demandas da indústria (Da Gloria, 2015).

Uma das aplicações mais promissoras do bioconcreto com resíduos de madeira é em sistemas de vedação, como paredes e divisórias. Sua baixa condutividade térmica e excelente capacidade de isolamento acústico o tornam ideal para essa finalidade, contribuindo para a eficiência energética e o conforto térmico dos edifícios (Da Gloria, 2020). Além disso, a redução no peso do material facilita o transporte e a instalação, reduzindo custos logísticos e de mão de obra. Essas características têm sido exploradas em projetos piloto e estudos de caso, que demonstram o potencial do bioconcreto para revolucionar o mercado de sistemas de vedação.

Outra aplicação prática do bioconcreto é em pavimentos leves, onde sua densidade reduzida e capacidade de isolamento térmico oferecem vantagens significativas. Pavimentos leves são especialmente úteis em estruturas que demandam menor carga, como edifícios altos e pontes (Moreira, 2008). A utilização de bioconcreto nesses contextos não apenas reduz o peso das estruturas, mas também contribui para a redução do consumo de energia, graças às suas propriedades térmicas superiores. Além disso, a

incorporação de resíduos de madeira pode melhorar a resistência à fissuração do pavimento, aumentando sua durabilidade.

As vantagens do bioconcreto em comparação com materiais convencionais são múltiplas. Além de suas propriedades térmicas e acústicas superiores, o material oferece benefícios ambientais significativos, como a redução de resíduos sólidos e a diminuição da pegada de carbono (Calvani, 2018). No entanto, o bioconcreto também apresenta desvantagens, como menor resistência mecânica em comparação com o concreto convencional e maior susceptibilidade à degradação em ambientes úmidos. Essas limitações exigem cuidados especiais durante a formulação e aplicação do material, bem como a adoção de técnicas de reforço e tratamento para garantir seu desempenho.

A viabilidade econômica do bioconcreto com resíduos de madeira tem sido amplamente estudada, com resultados promissores. Embora o custo inicial do material possa ser superior ao do concreto convencional, devido aos tratamentos necessários para os resíduos de madeira, os benefícios ambientais e econômicos ao longo do ciclo de vida do material compensam esse investimento (Zhang *et al.*, 2021). Por exemplo, a redução no consumo de energia para climatização e a maior durabilidade do material podem resultar em economias significativas ao longo dos anos. Além disso, a valorização de resíduos como matéria-prima pode reduzir os custos de produção, tornando o bioconcreto uma alternativa economicamente viável.

Estudos de mercado e análises de viabilidade econômica têm demonstrado o potencial do bioconcreto para se consolidar como uma solução sustentável e competitiva no mercado da construção civil. A crescente demanda por materiais de construção ecoeficientes, impulsionada por regulamentações ambientais mais rigorosas e pela conscientização dos consumidores, tem criado um ambiente favorável para a adoção do bioconcreto (Pacheco-Torgal *et al.*, 2013). Além disso, projetos piloto e estudos de caso em construções sustentáveis têm contribuído para a validação do material e para a disseminação de boas práticas.

Logo, o bioconcreto com resíduos de madeira apresenta um potencial significativo para o mercado da construção civil, com aplicações práticas que vão desde sistemas de vedação até pavimentos leves. Suas vantagens ambientais e econômicas, combinadas com a crescente demanda por materiais sustentáveis, posicionam o bioconcreto como uma solução promissora para o futuro da construção civil.

2.2.8. Desafios e Perspectivas Futuras

O desenvolvimento e a adoção do bioconcreto com resíduos de madeira enfrentam desafios técnicos, científicos e regulatórios que precisam ser superados para que o material alcance seu pleno potencial. No entanto, as perspectivas futuras são promissoras, com avanços tecnológicos e áreas de pesquisa emergentes que podem ampliar o uso de resíduos de madeira no concreto e consolidar o bioconcreto como uma solução sustentável para a construção civil (Da Gloria, 2020).

Um dos principais desafios técnicos no desenvolvimento do bioconcreto com resíduos de madeira é a compatibilidade entre os resíduos orgânicos e a matriz cimentícia. A adesão entre as partículas de madeira e o concreto, bem como os efeitos adversos da madeira na hidratação do cimento, são questões que requerem soluções inovadoras (Da Gloria, 2015). Pesquisas recentes têm explorado o uso de aditivos químicos, como sílica ativa e metacaulim, e técnicas de tratamento, como carbonização e modificação superficial, para melhorar a interação entre os componentes do material. Esses avanços têm permitido superar parcialmente os desafios técnicos, mas ainda há espaço para melhorias, especialmente em relação à durabilidade do bioconcreto em ambientes úmidos e expostos a intempéries.

Outro desafio significativo é a variabilidade na qualidade e nas propriedades dos resíduos de madeira, que podem afetar o desempenho do bioconcreto. Diferentes tipos de madeira apresentam composições químicas e características físicas distintas, o que exige ajustes na formulação do material para garantir consistência e qualidade (Calvani, 2018). A padronização dos resíduos de madeira e o desenvolvimento de diretrizes para sua seleção e tratamento são áreas de pesquisa que podem contribuir para a superação desse desafio. Além disso, a integração de tecnologias de processamento e caracterização de resíduos pode ajudar a garantir a qualidade e a uniformidade do material.

Segundo, Guo (2022) a regulamentação e a normatização do bioconcreto na construção civil também são desafios importantes. Atualmente, não há padrões específicos para a utilização de bioconcreto em aplicações estruturais e não estruturais, o que limita sua adoção em larga escala. A criação de normas técnicas e regulamentações que considerem as propriedades únicas do bioconcreto, como sua menor densidade e maior porosidade, é essencial para garantir a segurança e a confiabilidade do material. Além disso, a certificação de bioconcreto como material sustentável pode impulsionar sua aceitação no

mercado, especialmente em projetos que buscam certificações ambientais, como LEED e BREEAM.

O bioconcreto com resíduos de madeira apresenta um cenário promissor, com várias áreas de pesquisa emergentes que podem ampliar seu uso e melhorar seu desempenho. As perspectivas futuras incluem o desenvolvimento de bioconcretos multifuncionais, que combinam resíduos de madeira com outros materiais, como fibras naturais e nanopartículas, para conferir propriedades adicionais ao material (Zhang *et al.*, 2021). Por exemplo, a incorporação de nanopartículas de sílica pode melhorar a resistência mecânica e a durabilidade do bioconcreto, enquanto a adição de fibras naturais pode aumentar sua tenacidade e resistência à fissuração.

Outra área de pesquisa promissora é a utilização de tecnologias avançadas de caracterização e modelagem para otimizar a formulação do bioconcreto. O emprego de técnicas de inteligência artificial possibilita a previsão do desempenho dos materiais com base em sua composição e nos parâmetros de processamento, favorecendo a aceleração no desenvolvimento de novas formulações (Guimarães *et al.*, 2024). Além disso, a modelagem computacional pode ajudar a entender as interações entre os componentes do bioconcreto em nível molecular, permitindo a configuração de materiais com propriedades sob medida para aplicações específicas.

A adoção do bioconcreto em larga escala também depende da conscientização e da capacitação dos profissionais da construção civil. A disseminação de conhecimento sobre as vantagens e as boas práticas de utilização do bioconcreto é essencial para promover sua aceitação no mercado (Silva *et al.*, 2021). Programas de treinamento e capacitação, bem como a integração do bioconcreto em currículos de engenharia e arquitetura, podem contribuir para a formação de profissionais preparados para trabalhar com materiais sustentáveis.

Em resumo, o bioconcreto com resíduos de madeira enfrenta desafios técnicos, científicos e regulatórios que precisam ser superados para que o material alcance seu pleno potencial. Os avanços tecnológicos e as áreas de pesquisa emergentes indicam um futuro favorável para o uso de resíduos de madeira no concreto, consolidando o bioconcreto como uma solução sustentável para a construção civil. No entanto, a concretização dessas oportunidades e a superação dos desafios existentes dependem de um esforço conjunto entre pesquisadores, indústria, governo e profissionais da construção civil.

2.2.9. Conclusão

O bioconcreto com resíduos de madeira emerge como uma solução transformadora e sustentável para os desafios enfrentados pela construção civil no século XXI. Ao integrar resíduos orgânicos em sua matriz cimentícia, o bioconcreto não apenas promove a economia circular, reduzindo a geração de resíduos sólidos e a extração de recursos naturais, mas também oferece propriedades únicas, como baixa condutividade térmica, excelente isolamento acústico e redução de peso. Essas características o tornam uma alternativa atraente para aplicações como sistemas de vedação, pavimentos leves e outras estruturas que demandam eficiência energética e sustentabilidade.

Ao longo deste capítulo, explorou-se os aspectos fundamentais do bioconcreto, desde sua definição e histórico até suas propriedades físicas, mecânicas e térmicas. Logo, destaca-se a importância da compatibilidade entre os resíduos de madeira e a matriz de concreto, bem como as técnicas de tratamento e caracterização que têm permitido superar desafios técnicos e científicos. Além disso, discutiu-se os impactos ambientais positivos do bioconcreto, como a redução da pegada de carbono e a contribuição para a eficiência energética em edificações, posicionando-o como um material alinhado aos princípios da construção sustentável.

No entanto, a adoção em larga escala do bioconcreto ainda enfrenta obstáculos, como a necessidade de padronização dos resíduos de madeira, a criação de normas técnicas específicas e a conscientização dos profissionais da construção civil sobre suas vantagens e boas práticas de utilização. A superação desses desafios depende de um esforço conjunto entre pesquisadores, indústria, governo e profissionais do setor, além do investimento contínuo em pesquisa e desenvolvimento para aprimorar as formulações e técnicas de produção do material.

As perspectivas futuras para o bioconcreto são promissoras, com avanços tecnológicos e áreas de pesquisa emergentes, como o desenvolvimento de bioconcretos multifuncionais e a utilização de inteligência artificial para otimização de formulações. Esses avanços têm o potencial de ampliar o uso de resíduos de madeira no concreto e consolidar o bioconcreto como uma solução viável e competitiva no mercado da construção civil.

Por fim, o bioconcreto com resíduos de madeira representa uma convergência entre inovação, sustentabilidade e eficiência energética, oferecendo uma resposta concreta aos desafios ambientais e econômicos da construção civil. Sua adoção em larga escala pode

contribuir significativamente para a transição para uma economia de baixo carbono e para a construção de um futuro mais sustentável. Entretanto, para que esse potencial seja plenamente realizado, é essencial continuar investindo em pesquisa, desenvolvimento e capacitação, além de promover a colaboração entre todos os atores envolvidos na cadeia da construção civil. O bioconcreto não é apenas um material do futuro, é uma oportunidade para transformar o presente.

2.3. Desempenho térmico das edificações

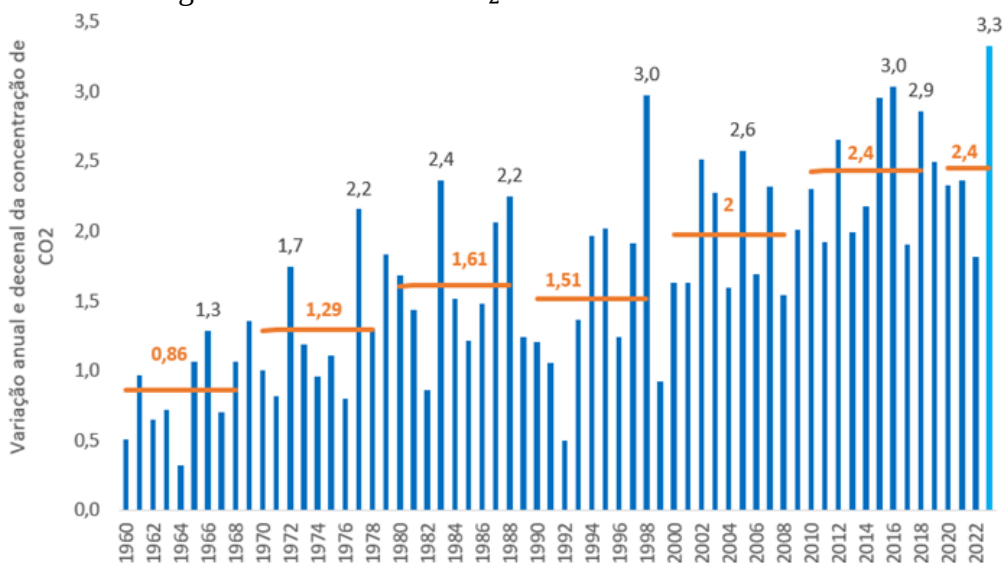
2.3.1. Contextualização do Desafio do Aquecimento Global e das Mudanças Climáticas

O aquecimento global e as mudanças climáticas são considerados um dos maiores desafios do século XXI. O aumento das temperaturas médias em todo o mundo - principalmente devido às emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) - tem resultado em uma série de eventos climáticos extremos, como calor intenso prolongado, períodos de seca, enchentes e tempestades mais intensas (Correa, 2024). Esses eventos não apenas representam uma ameaça para a diversidade biológica e os ecossistemas, mas também impactam a segurança alimentar da população urbana e na saúde pública em geral - demandando assim medidas de mitigação que privilegiem solução sustentável como resposta efetiva a esses problemas. Nesse cenário, a construção civil assume o papel de contribuir para as emissões de carbono, fato alimentado pelo intenso consumo de energia nos edifícios no que se refere a climatização dos edifícios tanto para refrigeração quanto para aquecimento.

Nos últimos 40 anos a demanda energética global tem aumentado de forma expressiva, impulsionada principalmente pelo rápido crescimento das cidades e da população urbana. Projeções indicam que, até o ano de 2100, aproximadamente 10,2 bilhões de pessoas viverão em áreas urbanas (DESA, 2024). Esse crescimento populacional urbano está diretamente vinculado a um aumento na geração de resíduos, resultado do consumo excessivo e desordenado de bens, um fenômeno que pode causar impactos significativos no meio ambiente. Com o aumento da migração para os centros urbanos é inevitável a crescente necessidade de infraestrutura residencial e serviços correspondentes. Esse cenário resulta em uma pressão cada vez maior sobre os recursos energéticos e

desencadeia um ciclo negativo de aumento do consumo e, consequente, uma maior emissão de gases do efeito estufa (Figura 9).

Figura 9: Emissões de CO₂ no mundo de 1960 a 2022.

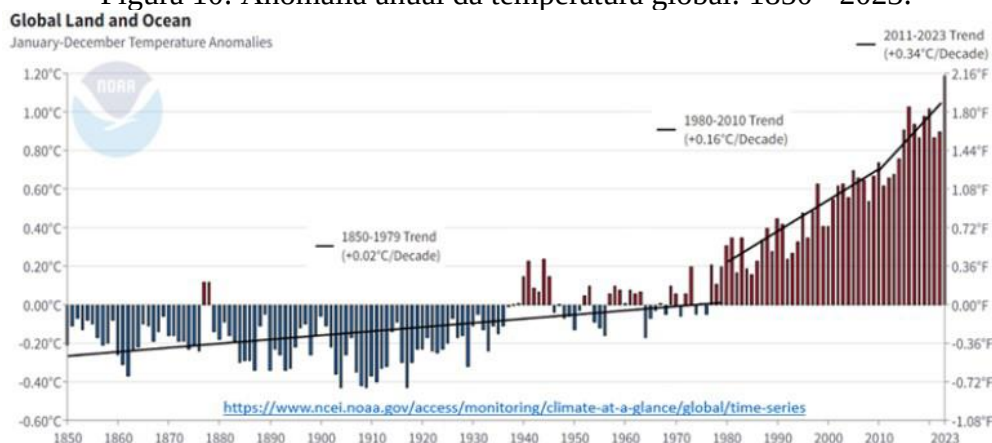


Fonte: NOAA. Global Monitoring Laboratory (2023)

Segundo o relatório divulgado pelo Instituto Europeu Copérnico em 9 de janeiro de 2024, o ano de 2023 foi oficialmente o mais quente já registrado desde 1850, com uma temperatura média global atingindo 14,98°C - um aumento de 0,17°C em relação ao recorde anterior estabelecido em 2016, e superando em 0,60°C a média de 1991 a 2020 e em 1,48°C em comparação com o período pré-industrial de 1850 a 1900.

O ano de 2023 foi notável por ter sido o primeiro em que todos os dias ultrapassaram 1°C acima do nível pré-industrial de 1850-1900. Aproximadamente 50% dos dias do ano tiveram temperaturas superiores a 1,5°C acima desse nível, e dois dias em novembro ultrapassaram, pela primeira vez, a marca de 2°C. De junho a dezembro de 2023, todos os meses foram mais quentes do que os correspondentes em qualquer outro ano registrado. Os meses de julho e agosto de 2023 foram os mais quentes já documentados, e setembro apresentou o maior desvio de temperatura acima da média de 1991-2020 registrado pelo Instituto Copérnico. Dezembro de 2023 também foi o mais quente já registrado globalmente para o mês, com uma temperatura média de 13,51°C, 0,85°C acima da média de 1991-2020 e 1,78°C acima do nível de 1850-1900 (Figura 10).

Figura 10: Anomalia anual da temperatura global: 1850 - 2023.



Fonte: Instituto Europeu Copernicus (2023)

Logo, o adequado funcionamento térmico das construções é crucial para atingir eficiência energética, uma vez que edifícios bem elaborados e construídos com materiais adequados podem diminuir o consumo de energia destinado ao controle de temperatura e proporcionar ambientes internos mais confortáveis. Para alcançar esse objetivo de forma eficiente é necessário considerar o isolamento térmico adequado da construção e sua orientação em relação ao sol junto com o uso de inovações tecnológicas que são aspectos fundamentais para melhorar o desempenho térmico das edificações (Righetti *et al.*, 2018).

Além disso, a arquitetura desempenha um papel central na concepção de soluções que integram funcionalidade, estética e sustentabilidade. Por meio de um planejamento criterioso, é possível alinhar o projeto arquitetônico às demandas climáticas e ambientais, aproveitando elementos naturais, como ventilação cruzada e iluminação solar, para reduzir o impacto energético. Nesse contexto, a escolha de materiais sustentáveis e estratégias passivas de design são ferramentas indispensáveis para promover construções mais eficientes e ambientalmente responsáveis, reforçando a importância da sinergia entre arquitetura e eficiência térmica.

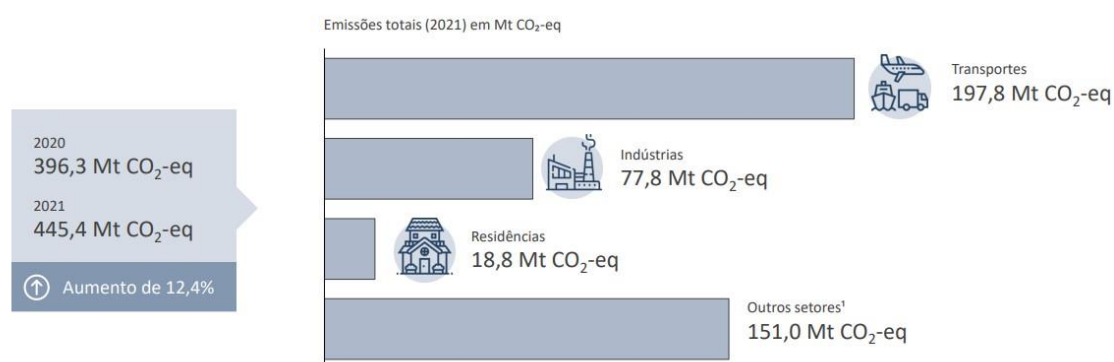
A relação intrínseca entre o funcionamento térmico e o conforto ambiental é fundamental para as práticas sustentáveis. Ter espaços internos que conseguem manter uma temperatura constante não apenas diminui o uso de energia como também assegura o conforto e bem-estar dos usuários. Isso adquire maior importância visto que passamos grande parte das nossas vidas em edifícios. Neste contexto, Righetti *et al.*, (2018) destacam a importância de incluir métodos construtivos e tecnologias que favoreçam a eficiência no controle térmico do ambiente e enfatizam a necessidade contínua de

conscientização sobre a importância dessas medidas como essenciais para lidar com os desafios impostos pelo aquecimento global.

Além disso é importante notar que estudos e avanços em materiais utilizados na construção civil e em sistemas de aquecimento e refrigeração estão desempenhando um papel fundamental na mudança do setor da construção civil para se tornar um defensor ativo da sustentabilidade ambiental.

No Brasil, observa-se um aumento nas emissões totais de dióxido de carbono (CO₂) vinculadas à composição da matriz energética brasileira, passando de 396,3 Mt CO₂-eq em 2020 para 445,4 Mt CO₂-eq em 2021 (Figura 11). Entretanto, segundo a previsão delineada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), estima-se que o crescimento futuro ocorrerá a uma taxa mais moderada até o ano de 2031, resultando em um acréscimo de apenas 1,7% ao ano (EPE, 2022b).

Figura 11: Total de emissões de CO₂ antrópicas associadas à matriz energética brasileira



Fonte: BEN (2021)

O setor de construção desempenha um papel importante nesse cenário, contribuindo de maneira significativa para as emissões globais de gases de efeito estufa. Desde a produção de materiais de construção até a operação e manutenção de edifícios, diversas etapas do ciclo de vida das edificações estão associadas a emissões prejudiciais ao meio ambiente. O uso extensivo de energia proveniente de fontes não renováveis e a dependência de processos industriais intensivos em carbono exacerbam o problema, reforçando a necessidade urgente de estratégias inovadoras (Baptista, 2022).

De acordo com Baptista (2022), tornar as construções mais sustentáveis é uma prioridade indiscutível nos dias de hoje. Para atingir esse objetivo de forma eficiente, é necessário adotar uma visão geral que englobe desde o planejamento inicial dos projetos até o funcionamento cotidiano dos edifícios. A integração de tecnologias sustentáveis, como

energias renováveis, sistemas inteligentes de gerenciamento predial e materiais de construção ambientalmente amigáveis, desempenha um papel crucial nesse processo. Além disso, ajustar a arquitetura para aproveitar a luz solar, a ventilação natural e outras características ambientais locais pode diminuir consideravelmente as necessidades de energia.

2.3.2. Regulamentação e Normas

O crescente entendimento dos impactos negativos das emissões de gases de efeito estufa no setor da construção tem impulsionado diversas pesquisas que têm mostrado uma mudança significativa no aspecto de soluções para lidar com o problema das mudanças climáticas e o aquecimento global. Diversas pesquisas têm mostrado as consequências das mudanças climáticas e a urgência em reduzir a pegada de carbono global. No final do século XX e no começo do século XXI houve um aumento significativo na adoção de normas e regulamentos focados no desempenho termoenergético (Almeida, 2019). Organizações internacionais e governos nacionais passaram a estabelecer padrões mais exigentes para eficiência energética em construções.

No Brasil há mais de 40 anos o país tem adotado medidas e iniciativas em alguns setores. No setor elétrico um destaque é o Programa de Etiquetagem Brasileiro (PEB), que disponibiliza dados sobre a eficiência energética de aparelhos eletrodomésticos para facilitar a escolha de compra mais consciente. Além disso existem iniciativas como o PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica), que estimula a utilização eficiente da eletricidade e o ENCE (Etiqueta Nacional de Conservação de Energia), que promove o consumo eficiente de gás e combustíveis (EPE, 2022).

Para avaliar a eficiência energética de construções no Brasil é utilizado o Selo Procel Edificações desde 2014. Seu propósito é verificar o grau de eficiência energética de cada prédio conforme as normas estabelecidas na obtenção do Selo Procel de Economia de Energia para prédios comerciais e residenciais (PROCELINFO). Têm-se ainda os selos de certificação LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), que possui reconhecimento global e visa promover a eficiência energética dos edifícios enquanto garante o bem-estar dos ocupantes através da definição de padrões para a criação de construções sustentáveis (USBGC, 2023). A certificação AQUA-HQE (Alta Qualidade Ambiental), aplicada no Brasil, é uma adaptação da certificação francesa HQE™ (Haute Qualité Environnementale). Desenvolvida em parceria com a Universidade de São Paulo

(USP), essa certificação foi contextualizada para atender às especificidades culturais, climáticas e normativas brasileiras. Seu objetivo é promover construções sustentáveis e eficientes ao longo de todo o ciclo de vida dos empreendimentos, abrangendo desde a concepção até a operação e manutenção (Vasconcelos, L. e Sousa, J., 2019). Por outro lado, o BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), criado no Reino Unido em 1990, é uma das certificações de sustentabilidade mais antigas e amplamente reconhecidas globalmente. Utilizado em mais de 70 países, o BREEAM avalia o desempenho ambiental de edificações em diversas categorias, incluindo energia, água, saúde e bem-estar, transporte, materiais, resíduos, uso do solo e ecologia, poluição e gestão (Breeam, 2023).

Além das certificações internacionais, destaca-se o Selo Casa Azul (SCA), uma iniciativa nacional promovida pela Caixa Econômica Federal desde 2009. Esta certificação foi pioneira ao estabelecer critérios específicos para medir a sustentabilidade dos empreendimentos no contexto da construção civil brasileira, especialmente voltada para a Habitação de Interesse Social (HIS), alinhado às normas internacionais e aplicado em políticas públicas (Santos, F. e Almeida, M., 2018).

A busca por certificações verdes, como edifícios com certificações citadas anteriormente, evidencia uma mudança de paradigma em direção à construção ecoconsciente. Arquitetos, engenheiros e construtores passaram a considerar o desempenho termo-energético não apenas como uma necessidade ambiental, mas também como uma estratégia para otimizar custos operacionais e promover ambientes internos mais saudáveis e confortáveis (Kibert, 2020).

Apesar de sua importância, as certificações e selos de eficiência energética também estão sujeitas a críticas, especialmente no que diz respeito à sua abordagem e alcance. Uma vez que, que essas certificações tendem a dar prioridade a aspectos ambientais, como a redução do consumo de energia e o uso de materiais sustentáveis, deixando em segundo plano dimensões sociais e econômicas da sustentabilidade. Questões como acessibilidade, equidade social e o bem-estar dos ocupantes nem sempre são abordadas de forma abrangente, o que pode limitar o impacto positivo dessas iniciativas.

Outro desafio significativo está relacionado aos custos e à complexidade do processo de certificação. Para pequenos empreendimentos e projetos de habitação social, os valores envolvidos – que incluem contratação de consultores, auditorias e implementação de

melhorias – podem ser proibitivos. Isso acaba restringindo a adoção dessas práticas justamente em setores onde elas poderiam gerar um impacto transformador.

Além disso, há casos em que o desempenho real de edificações certificadas não corresponde às expectativas. Isso pode ocorrer devido a diferenças entre o planejamento e o uso cotidiano, manutenção inadequada ou até o comportamento dos usuários. Essa disparidade levanta dúvidas sobre a eficácia dos critérios de certificação em garantir melhorias práticas e mensuráveis.

Por fim, existe o risco de que a certificação seja usada apenas como estratégia de marketing, sem um compromisso genuíno com a sustentabilidade. Isso pode enganar consumidores, além de enfraquecer a credibilidade das certificações como ferramentas de transformação ambiental.

Portanto, embora sejam instrumentos valiosos, as certificações de eficiência energética precisam evoluir continuamente. É fundamental que incorporem aspectos sociais e econômicos, simplifiquem seus processos, garantam a ligação entre certificação e desempenho real, e mantenham um compromisso genuíno com a sustentabilidade. Só assim elas poderão atingir plenamente seu potencial como agentes de mudança na construção civil.

No que se refere aos regulamentos, a legislação inclui Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicos – RTQ-C (BRASIL, 2010), o Regulamento Técnico de Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais - RTQR (BRASIL, 2012), atual INIR, Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais que estabelece os parâmetros e as abordagens para avaliar a eficiência energética de construções residenciais, com o propósito de atribuir etiquetas de desempenho. Além disso esses critérios consideram uma variedade de elementos como isolamento térmico adequado e eficiência dos sistemas de iluminação e ventilação para garantir um ambiente climatizado confortável e eficiente em termos energéticos. O objetivo é estabelecer um sistema de classificação que apresente de forma clara o desempenho em termos de consumo energético de um edifício específico para auxiliar consumidores e profissionais do ramo na tomada de decisões fundamentadas em prol da promoção de práticas construtivas mais sustentáveis e da adoção de tecnologias energeticamente mais eficientes.

Além das normas e regulamentos, foram estabelecidas orientações de construção com base nas diversas zonas bioclimáticas do Brasil para auxiliar no desenvolvimento de projetos visando melhorar o desempenho termoenergético das edificações. Essas diretrizes consideram as características climáticas específicas de cada região do país, como temperatura, umidade e exposição solar, para guiar na seleção dos materiais, técnicas construtivas e sistemas de ar condicionado mais adequados. A norma NBR15220-3 (2024) fornece orientações técnicas e construtivas para garantir um desempenho térmico adequado em edificações. É importante ressaltar que essas recomendações e diretrizes não têm caráter normativo e são destinadas à adequação climática de habitações unifamiliares de interesse social. A norma estabelece limites para transmitância térmica, atraso térmico e fator solar de coberturas e paredes, bem como valores necessários para áreas de abertura para ventilação e sombreamento de janelas.

Além disso, a seleção dos materiais de construção pode ser influenciada pelas condições climáticas da região local; por exemplo, optar por materiais que resistam à umidade em áreas úmidas. Essas práticas podem ser ajustadas para diversas regiões e lugares e devem ser levadas em consideração ao longo de todas as etapas do projeto desde a sua concepção até a execução e funcionamento da construção. Isso pode requerer a cooperação entre arquitetos, engenheiros, empreiteiros, bem como os proprietários dos edifícios para assegurar a correta implementação das estratégias de forma sustentável que atendam às necessidades dos usuários.

Logo, conclui-se que as diretrizes de construção baseadas nas zonas bioclimáticas contribuem para a redução do impacto ambiental das edificações e para a criação de espaços internos mais agradáveis e confortáveis para os usuários. Ao levar em consideração detalhadamente as condições climáticas locais, podemos alcançar edifícios mais eficientes em termos energéticos e no uso de materiais e recursos naturais. Essa abordagem visa mitigar o elevado consumo de energia das construções que geralmente está relacionado ao uso intensivo de sistemas artificiais de climatização tais como ar-condicionado e aquecimento central. Essas tecnologias consomem uma quantidade significativa de energia elétrica que acaba aumentando as emissões de gases de efeito estufa e os custos operacionais das edificações (Almeida, 2019).

Para tal, a implementação de estratégias eficientes para alcançar o objetivo da minimização de impactos ambientais exige uma colaboração estreita entre governos, setor privado, comunidades locais e profissionais da construção, uma vez que a formulação e

implementação de políticas públicas que incentivem práticas construtivas sustentáveis, bem como a promoção de incentivos financeiros para investimentos em edifícios ecoeficientes, são passos essenciais nessa direção (Berleza, 2022).

2.3.3. Materiais x Conforto Térmico

A utilização de materiais com baixo impacto ambiental na construção civil é uma das principais estratégias para melhorar o desempenho térmico das edificações e reduzir os efeitos adversos da indústria da construção sobre o meio ambiente. Esses materiais, com menor impacto ambiental, oferecem propriedades térmicas que contribuem para a eficiência energética dos edifícios. À medida que cresce a demanda por edificações ambientalmente responsáveis, a indústria da construção tem direcionado seus esforços para a pesquisa e a adoção de novos materiais inovadores (Silva *et al.*, 2021).

De acordo com Silva *et al.*, (2021), um dos aspectos mais importantes dos materiais de baixo impacto ambiental é sua capacidade para proporcionar um desempenho térmico eficaz enquanto reduzem ao máximo o impacto ambiental. Por exemplo, o emprego de madeira certificada, visto ser renovável, com um baixo impacto de carbono, e cada vez mais está sendo adotada em projetos que buscam alto desempenho térmico. Além de suas qualidades como isolante térmico, a madeira tem também a capacidade de absorver carbonos, contribuindo para diminuir as emissões de gases de efeito estufa relacionadas ao ciclo de vida das construções prediais. Essas características fazem da madeira uma opção ideal para construções sustentáveis.

Materiais com impactos reduzidos no meio ambiente ganham destaque na construção de edifícios que priorizam eficiência térmica, como é o caso do tijolo de adobe e do bambu. O adobe é produzido a partir de terra crua e se destaca como um regulador térmico natural eficaz: ele mantém as estruturas frescas durante o verão e quentes no período mais frios. Já o bambu é reconhecido por sua resistência e flexibilidade - além de crescer rapidamente - tornando-se uma opção que pode ser colhida sem prejudicar o ecossistema circundante. Ambos os tipos de materiais têm sido empregados em projetos de construção sustentável em diversas partes do mundo; isso mostra que é viável mesclar elementos tradicionais com novas abordagens para atingir um bom desempenho em termos de isolamento (Silva *et al.*, 2021).

Frente ao exposto, os biomateriais frequentemente possuem características térmicas superiores que contribuem para melhorar o isolamento térmico das edificações. Isso implica que podem auxiliar na diminuição da necessidade de sistemas de ar condicionado artificiais, favorecendo assim uma maior eficiência energética (Augusto *et al.*, 2018).

Nesse contexto, reduzir o uso excessivo de sistemas de ar condicionado tem se tornado uma preocupação crescente ao buscar solucionar de maneira sustentável e eficiente os desafios da construção civil atualmente. Esses sistemas demandam grandes quantidades de energia para aquecer ou resfriar ambientes, isso não apenas elevando os custos operacionais envolvidos, mas também contribuindo para as emissões de gases do efeito estufa e impactar negativamente o meio ambiente. Uma estratégia eficiente para reduzir essa dependência em climatização artificial é adotar medidas construtivas que priorizem o conforto térmico passivo. Esses métodos vislumbram potencializar a utilização dos elementos naturais como a luz solar e a ventilação no propósito de regular a temperatura internamente nos prédios (Pacheco, 2013).

A importância do isolamento térmico é evidente nesse contexto em questão: ao empregar materiais isolantes em paredes e pisos dos edifícios para redução das trocas térmicas com o ambiente circundante é possível manter uma temperatura internamente mais estável ao longo do ano – implicando assim na diminuição da necessidade do uso excessivo dos sistemas aquecimento no período do frio e refrigeração no período do calor (Almeida, 2023).

Uma outra estratégia relevante é promover a ventilação natural através de métodos apropriados. Posicionar as janelas de forma estratégica e usar aberturas ajustáveis possibilitando a entrada de ar puro e saída do ar quente, gerando uma circulação natural que contribui para controlar a temperatura internamente (Augusto *et al.*, 2018).

Além disso, escolher materiais de construção adequados, como vidros eficientes, desempenha um papel crucial na diminuição da necessidade de sistemas de climatização artificiais. Os vidros com baixa emissividade e a tecnologia de camada dupla auxiliam na redução da passagem de calor através das janelas e contribuem para manter uma temperatura mais confortável no interior dos edifícios (Augusto *et al.*, 2018).

2.3.4. Exemplos

Para compreender completamente o impacto do uso de estratégias de desempenho térmico, é fundamental analisar exemplos reais de projetos que tenham aplicado essas ideias com êxito. Casos práticos de construções que alcançaram elevados níveis de eficiência térmica fornecem valiosas lições sobre a implementação efetiva das tecnologias, materiais e novidades. Essas edificações não apenas evidenciam as potencialidades técnicas disponíveis, mas também ilustram como a eficiência térmica pode ser obtida em diferentes ambientes climáticos e econômicos.

Um caso exemplo de desempenho no controle térmico é o projeto da “Casa Passiva”, localizada em Darmstadt na Alemanha e reconhecida internacionalmente por sua abordagem sustentável na construção civil. Com elevada eficiência e desempenho térmico, além de janelas de alto rendimento energético combinadas com um sistema de ventilação que recupera calor do ambiente interno da casa para conservar energia ao longo do ano todo e manter uma temperatura internamente confortável. (Augusto *et al.*, 2018).

Outro exemplo notável é o prédio “Bullitt Center”, localizado em Seattle nos Estados Unidos e muitas vezes considerado o edifício mais ecológico do mundo. Esse prédio comercial incorporou diversas tecnologias de eficiência energética, como painéis solares, sistemas de coleta e tratamento de água da chuva e isolamento térmico avançado. Além de suprir suas necessidades energéticas por meio de fontes renováveis, o Bullitt Center também funciona como um ambiente experimental para estudar métodos de construção sustentável. A estrutura evidencia a viabilidade de integrar eficiência térmica avançada com outros elementos de sustentabilidade para criar um ambiente que seja simultaneamente prático e ecologicamente consciente (Tosta, 2017).

No Brasil o projeto chamado “Casa Ecológica”, localizado em Natal (Rio Grande do Norte), ilustra como o conforto térmico pode ser ajustado para regiões tropicais. Através do uso de estratégias passivas como ventilação cruzada e sombreamento natural e materiais locais na construção - como o adobe e tijolos de solo-cimento - essa casa sustentável mantém uma temperatura internamente confortável sem depender de ar-condicionado. Este estudo evidencia que mesmo em áreas com clima quente e úmido é viável obter um bom desempenho térmico por meio de soluções adequadas às condições (Augusto *et al.*, 2018).

Esses exemplos de casos práticos demonstram como novas estruturas podem alcançar eficiência térmica em uma ampla variedade de situações. Mesmo diante de limitações regionais específicas é viável construir edifícios que não só satisfazem as necessidades de confortos dos usuários, mas também contribuem para a sustentabilidade do meio ambiente.

Outro ponto relevante a ser considerado nos estudos de caso é a forma como as condições climáticas e culturais locais influenciam as estratégias de desempenho térmico. Por exemplo, em regiões áridas do Oriente Médio, como Dubai, a eficiência térmica é obtida através de técnicas que combatem o calor extremo, como o uso de materiais de alta refletância e a integração de sistemas de resfriamento passivo, como pátios internos sombreados e fontes de água que auxiliam no resfriamento evaporativo. Esses métodos mostram que as soluções devem ser adaptadas ao clima local, e que uma abordagem única não é viável para todas as regiões.

Esses exemplos também ressaltam como é importante adotar uma abordagem abrangente na criação de edifícios com alta eficiência térmica. Em vez de se concentrar apenas em uma única tecnologia ou material, os projetos mais bem-sucedidos combinam várias estratégias, desde a seleção de materiais até o planejamento arquitetônico e o uso de sistemas inteligentes - para alcançar o máximo desempenho possível.

Além disso, esses exemplos ilustram que, ao considerar cuidadosamente os aspectos relacionados ao conforto térmico, é viável construir edifícios que não apenas respeitam o meio ambiente, mas também proporcionam uma qualidade de vida superior para seus habitantes. Edifícios que conseguem manter uma temperatura interna amena sem depender demais de sistemas de ar condicionado artificial são mais acolhedores para viver ou trabalhar, além de serem mais econômicos no longo prazo pela redução dos custos energéticos. Isso gera um ciclo positivo em que a sustentabilidade, a eficácia e o bem-estar se complementam reciprocamente.

Essas análises de casos destacam a importância de políticas e regulamentos que promovam e até mesmo exijam a implementação de práticas sustentáveis na construção civil. Sem um enquadramento regulatório que apoie a eficiência energética e o uso de materiais sustentáveis, muitos desses projetos inovadores poderiam não ter sido viáveis do ponto de vista econômico. Portanto, o êxito dessas iniciativas também serve como um apelo à ação para que governos e organizações adotem políticas que incentivem a construção de edifícios mais eficientes e resilientes.

2.3.5. Desafios Locais e Soluções Adaptáveis

Embora a questão do desempenho térmico das construções seja um problema globalmente reconhecido de grande relevância e complexidade a ser enfrentado coletivamente pela sociedade humana como um todo, as soluções efetivas para otimizar esse desempenho muitas vezes se baseiam em um profundo entendimento das condições específicas de cada localidade geográfica e cultural. Cada região do planeta possui suas características climáticas próprias e únicas que são influenciadas diretamente por fatores culturais e econômicos locais que moldam as demandas e possibilidades de construção disponíveis nesses locais específicos. Assim sendo, a identificação dessas peculiaridades locais e o desenvolvimento de soluções adaptáveis tornam-se cruciais para assegurar que as edificações sejam capazes de alcançar níveis máximos de eficiência térmica em qualquer ambiente ou contexto onde estejam inseridas (Almeida, 2019).

No Brasil, a diversidade climática e cultural resultou em uma rica variedade de práticas construtivas adaptadas às condições locais. No sertão nordestino, por exemplo, as casas de taipa, feitas de barro e madeira, são comuns devido à escassez de pedras e à abundância de terra e madeira. Essas construções utilizam paredes espessas que retardam a transferência de calor, mantendo os interiores frescos durante o dia e confortáveis à noite. As aberturas são estrategicamente posicionadas para minimizar a entrada de calor e maximizar a ventilação natural (Lamberts *et al.*, 2014).

Segundo Lamberts *et al.* (2014), na região amazônica, com clima equatorial úmido, as habitações tradicionais, como as palafitas, são construídas sobre estacas de madeira para enfrentar as enchentes sazonais. Essas estruturas promovem excelente ventilação cruzada e permitem a dissipação eficiente do calor e da umidade, proporcionando conforto térmico sem a necessidade de sistemas mecânicos.

No sul do Brasil, onde os invernos podem ser rigorosos, as construções tradicionais refletem influências de imigrantes europeus, como os pomeranos. As casas apresentam paredes espessas e materiais com alta inércia térmica, que ajudam a reter o calor interno. Além disso, o uso de janelas estrategicamente posicionadas permite a entrada de luz solar durante o dia, contribuindo para o aquecimento dos ambientes internos.

Além das condições climáticas, os aspectos culturais também influenciam significativamente na definição das abordagens para o conforto térmico. Em diversas áreas geográficas, as práticas de construção tradicionais fornecem ideias valiosas sobre

maneiras de atingir o bem-estar térmico de maneira sustentável. Por exemplo as construções feitas de adobe no sudoeste dos Estados Unidos e no México usam paredes grossas de terra para manter a temperatura durante o dia e o calor à noite, já as edificações tradicionais do Sudeste Asiático frequentemente possuem grandes telhados inclinados e áreas amplas para favorecer a circulação do ar e diminuir a umidade (Augusto *et al.*, 2018).

As condições econômicas também têm impactos nas soluções de desempenho térmico em diferentes áreas geográficas onde os recursos financeiros são escassos. Pode não ser viável introduzir tecnologias avançadas nessas situações específicas. Nessas circunstâncias particulares, a utilização de materiais locais disponíveis juntamente com estratégias de eficiência energética torna-se ainda mais cruciais. A simplicidade e o custo dessas alternativas podem ser igualmente eficientes do que tecnologias mais complexas, a partir do momento em que são adequadamente adaptadas ao ambiente local.

A investigação localizada desempenha um papel essencial na criação de soluções flexíveis que considerem todos esses fatores variáveis importantes. Universidades, centros de pesquisa e organizações têm uma grande responsabilidade ao realizar estudos que avaliam como os edifícios lidam com o calor em diferentes áreas e identificam as abordagens mais adequadas para cada cenário específico. Através de testes e análises minuciosas é viável determinar quais materiais de construção funcionam melhor em diferentes climas e quais projetos arquitetônicos apresentam o melhor desempenho em ambientes específicos - isso assegura a eficiência e efetividade das soluções implementadas.

2.3.6. Conclusão

A maior disseminação desses materiais com elevada eficiência termoenergética na indústria de arquitetura e construção civil pode ser vista como uma potencial solução para lidar com as mudanças climáticas.

Vale ressaltar que em um país tão extenso e diversificado como o Brasil, é fundamental reconhecer que as condições climáticas e as demandas energéticas variam significativamente de uma região para outra. O que funciona bem em um local pode não ser apropriado em outro, destacando a importância de estratégias flexíveis e adaptáveis. Ao enfrentar os desafios energéticos e climáticos, é crucial considerar não apenas as

diferenças climáticas, mas também os aspectos culturais e econômicos que moldam as necessidades e oportunidades de cada comunidade. O que pode funcionar como uma solução viável em uma região economicamente próspera pode não ter o mesmo sucesso em outra com recursos limitados (Koivukangas, 2022).

Em suma, o bom desempenho térmico das construções tem um papel crucial em promover a sustentabilidade e em reduzir os impactos das mudanças climáticas. Aperfeiçoar o desempenho térmico pode levar a uma diminuição significativa no consumo de energia e nas emissões de gases do efeito estufa enquanto também melhora o conforto ambiental e a qualidade de vida dos moradores. Contudo para atingir essas metas é necessário adotar uma perspectiva integrada que una avanços tecnológicos com materiais sustentáveis e um design arquitetônico inteligente além de políticas públicas eficientes.

Colaboração em escala global é essencial para buscar soluções sustentáveis que sejam energeticamente eficientes. É crucial que governos, empresas, universidades e sociedade trabalhem juntos para criar práticas que aprimorem o controle térmico de edifícios, fomentando um futuro mais sustentável e resiliente. A priorização do desempenho térmico nas práticas de projeto e construção é um passo crucial para alcançar os objetivos climáticos globais e garantir um ambiente construído que seja seguro, confortável e sustentável para as gerações futuras.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão expostas as técnicas empregadas para a análise dos materiais e dos bioconcretos com a adição de serragem, no que se refere ao seu comportamento no estado fresco, através de ensaio de abatimento e no estado endurecido, para a avaliação das propriedades físicas, mecânicas e térmicas. Essa etapa também teve como finalidade verificar a viabilidade construtiva da composição proposta e avaliar sua execução prática.

Em seguida, para avaliar empiricamente o comportamento térmico de painéis de vedação, foi utilizado um procedimento experimental para estimar a condutividade térmica (Almeida, 2019). A metodologia envolve, também, simulações computacionais, via Programa EnergyPlus, realizadas em duas etapas. Na primeira etapa foram realizadas simulações com dados de materiais cimentícios com incorporação de serragem, obtidos da literatura. Em uma segunda etapa, a simulação computacional foi realizada com os dados obtidos experimentalmente

Vale ressaltar que as análises de espalhamento e resistência à compressão, foram feitas para todas as frações volumétricas propostas (15%, 25%, 35%, 45% e 55%). Os painéis para análise térmica foram produzidos para as frações volumétricas de 35%, 45% e 55%, visto que as frações mais reduzidas de resíduo poderiam não apresentar influência significativa sobre a eficiência térmica.

Todos os ensaios foram realizados conforme procedimentos estabelecidos por normas. Caso haja necessidade de adaptação de algum procedimento de norma, este será apresentado de forma mais minuciosa.

Por fim, foram realizadas simulações computacionais com o objetivo de comparar o desempenho dos diferentes sistemas construtivos empregados em habitações de interesse social. Sendo assim, nessas simulações, foram testadas variações no painel de vedação vertical com diferentes frações volumétricas (35%, 45% e 55%) de serragem em matriz cimentícia.

3.1. Seleção, beneficiamento e caracterização dos materiais

3.1.1. Cimento Portland

Objetivando uma alta resistência inicial, que pode resultar em desformas rápidas, foi utilizado o cimento Portland CPV-ARI da empresa CSN Cimentos Brasil.

O equipamento para determinar a granulometria foi o granulômetro a laser obtida no Núcleo de Ensino e Pesquisa em Materiais e Tecnologias de Baixo Impacto Ambiental na Construção Sustentável (NUMATS Poli/COPPE) e os valores de massa específica foram obtidos seguindo os requisitos da ABNT NBR 16605:2017, enquanto os ensaios de resistência a compressão foram verificados com uso da prensa hidráulica servocontrolada, com estrutura da AMSLER com capacidade de 150 toneladas, de acordo com os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 7215:2019, em 1, 7 e 28.

3.1.2. Serragem de Madeira

3.1.2.1. Origem e obtenção da serragem

A serragem utilizada para a presente pesquisa tem origem a partir da mistura de resíduos do tipo de madeira dicotiledônea produzidos pela marcenaria Madeirama, localizada na Ilha do Governador no Estado do Rio de Janeiro. As espécies que compõem os resíduos são: Cedro, Angelim Pedra e Maçaranduba.

Vale ressaltar que a serragem é composta por 2 frações, sendo elas fina (pó) e grossa (lasca). A partir de literaturas (Aguiar, 2020; Calvani, 2018; Da Gloria, 2020; Silva, 2021), concluiu-se que a fração mais fina libera mais extrativos, em comparação à fração grossa. Nas literaturas, observa-se uma escassez de estudos voltados para a fração em lasca, apesar de sua importância como subproduto da indústria madeireira. Considerando sua geração em larga escala, uma destinação adequada pode desempenhar um papel importante na preservação ambiental, destacando sua relevância nesse contexto. Atualmente, grande parte desse material é descartada sem um aproveitamento eficiente, sendo queimada ou depositada em aterros sanitários, o que reforça a importância de explorar sua viabilidade na indústria da construção civil. Com isso, foi necessário peneirar o material em peneira de 1,18mm, para retirar a parte fina. Por essa razão apenas a fração grossa (lasca – diâmetro acima de 1,18mm) foi utilizada na produção dos bioconcretos, conforme Figura 12.

Figura 12 – a) Fração < 1,18 mm b) Fração > 1,18 mm



Fonte: O autor

Posteriormente, a serragem foi acondicionada em sacos de plástico até o momento de uso.

3.1.2.2. Tratamento da serragem

Em síntese, o beneficiamento consistiu de ciclos de lavagem do resíduo realizados em água a 80° C dentro de uma panela, aquecida sobre uma chapa metálica. Cada ciclo durou cerca de 1 hora, com intervalo de 30 minutos para resfriamento e troca da água com os extrativos oriundos da madeira. A título de exemplificação, a Figura 13 apresenta o estado da água, após o primeiro ciclo de lavagem, com uma coloração marrom escura, devido à grande quantidade de extrativo presente na serragem.

Figura 13 – Coloração da água após a primeira lavagem

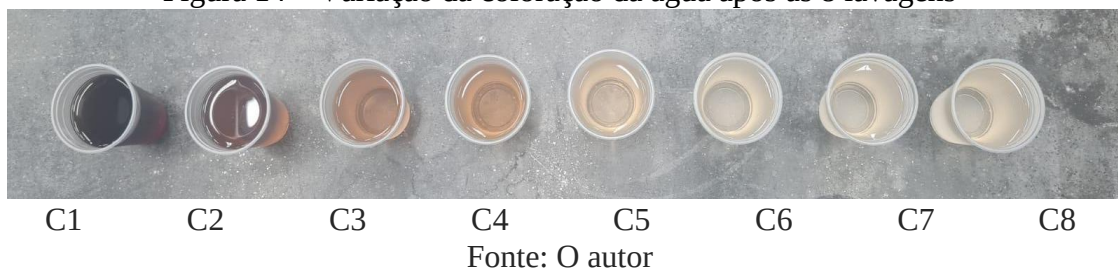


Fonte: O autor

Em seguida, o material foi tratado por mais sete ciclos de lavagem (C2 a C8) até que a coloração da água se tornasse clara e não variasse (visualmente) entre 3 ciclos

consecutivos (C6 a C8), o que representou a maior remoção de extrativos dentro do procedimento executado Figura 14.

Figura 14 – Variação da coloração da água após as 8 lavagens



Após as lavagens finalizadas, a serragem foi seca por 7 dias e depois armazenada até o momento de uso

3.1.2.3. Caracterização física da serragem

O resultado referente a composição granulométrica da serragem será apresentado no capítulo 4 que foi calculada de acordo com a norma ABNT NBR 17054:2022. A Figura 15 exibe a serragem empregada.

Figura 15 – Serragem de madeira utilizada



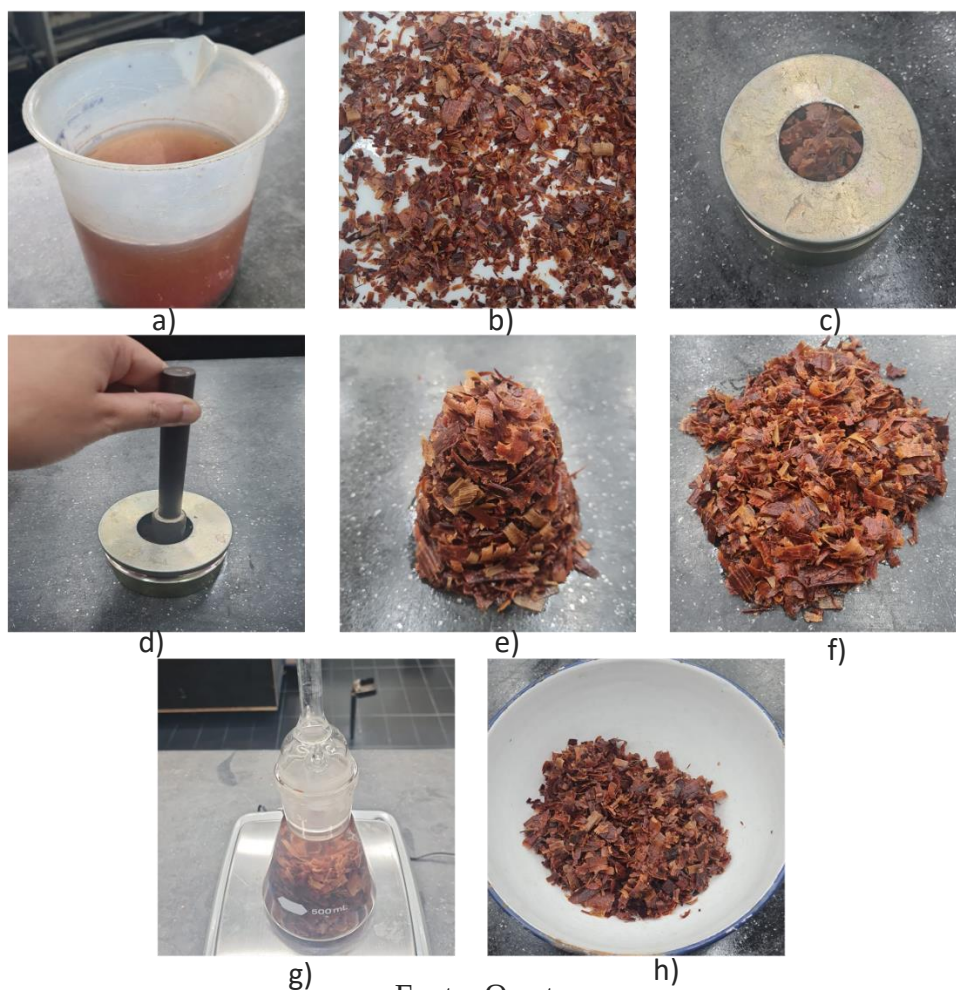
Fonte: O autor

O nível de umidade da serragem foi determinado conforme especificações da NBR 9939/2021 a partir de três frações de 100 gramas de serragem.

Sobre os ensaios de massa específica e capacidade de absorção, estes foram realizados conforme procedimentos das normas ABNT NBR 16916:2021 e ABNT NBR 16917:2021, respectivamente, conforme pode ser visto na Figura 16 e na Figura 17. Como não há um ensaio padrão para materiais como a serragem, a determinação de massa

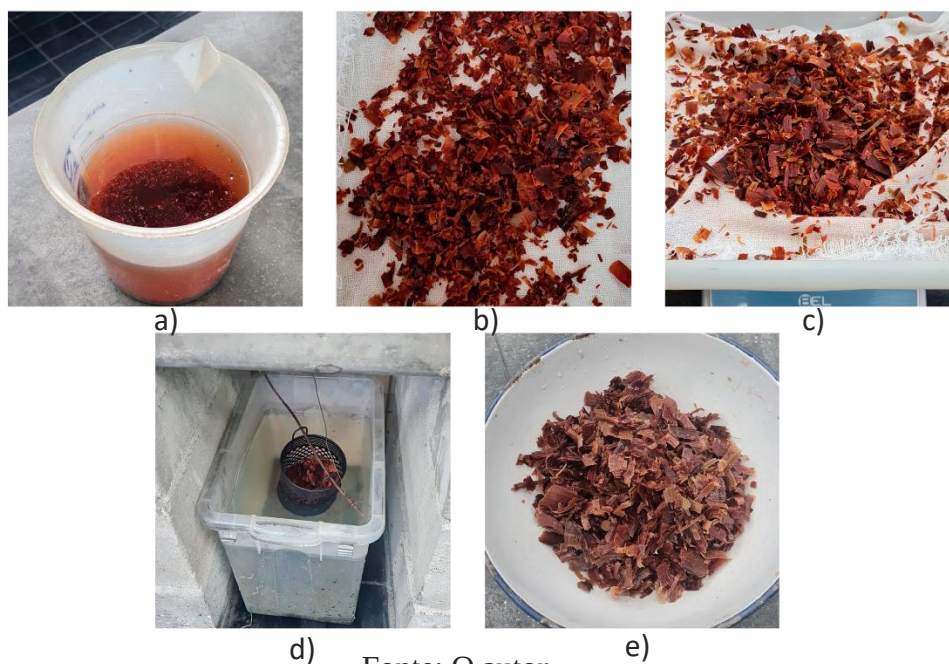
específica e absorção foram obtidas com base nas duas normas que são utilizadas para agregado miúdo e agregado graúdo, a fim de avaliar qual o método é capaz de oferecer uma resposta adequada acerca da caracterização da serragem com fração granulometria $> 1,18\text{mm}$. Logo, foram utilizadas três porções de 100 gramas do material para cada norma e o resultado foi calculado com a média desses resultados.

Figura 16 – a) Material em água por 24h b) Secagem ao ar livre c) Serragem após sua inserção no tronco cônico d) Aplicação de 25 golpes e) Material saturado superficialmente úmido f) Material saturado superficialmente seco g) Pesagem do material com 100 g de amostra no frasco de 500 ml h) Serragem após secagem na estufa de 105°C



Fonte: O autor

Figura 17 – a) Material em água por 24h b) Material saturado superficialmente seco c) Pesagem da amostra d) Material submerso em água e) Material após secagem na estufa de 105°C



Fonte: O autor

Os dados referentes à umidade da serragem empregada, bem como sua densidade e capacidade de absorção, serão apresentados no capítulo 4 referentes aos resultados obtidos dos ensaios.

É importante destacar que antes dos ensaios de caracterização, o material foi homogeneizado e quarteado, com a formação de pilha cônica.

3.1.3. Água

Em toda fase do experimento foi utilizada a água proveniente da rede de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro.

3.1.4. Agente modificador de viscosidade

O agente modificador de viscosidade foi utilizado com o objetivo de garantir a coesão dos materiais, evitando dessa forma a exsudação da pasta de cimento e a segregação da serragem. Com isso, o VMA utilizado é o Rheomac VMA538. Para tal, foi utilizado o teor de 0,1% em relação à massa de cimento.

3.1.5. Aditivos químicos

3.1.5.1. Superplastificante

O superplastificante foi utilizado com o objetivo de reduzir a quantidade de água na mistura, sem comprometer sua trabalhabilidade e aumentar a fluidez sem alterar a relação água/cimento. Com esse propósito, o superplastificante utilizado foi o Glenium 51, do tipo éter policarboxílico, fabricado pela empresa BASF. O dispersante possui um teor de sólidos de 30%, com densidade em torno de 1.073 kg/m³ e pH aproximado de 6. Além disso, necessitou-se verificar a compatibilidade do mesmo com o cimento e para tal esses resultados foram obtidos seguindo os requisitos da ABNT NBR 11768:2019.

3.1.5.2. Cloreto de cálcio (CaCl₂)

O cloreto de cálcio puríssimo anidro foi utilizado para acelerar a pega do cimento, uma vez que os componentes químicos presentes na serragem tendem a aumentar o tempo de pega. Logo, foi adotado um teor de 3% em relação à massa de cimento, com base nos resultados satisfatórios obtidos em pesquisas de Fuwape *et al.*, (1993), Latorraca (2000), Pimentel (2000) e Iwakiri *et al.*, (2008).

As dosagens que serão utilizadas para a produção dos concretos, o consumo de materiais e a produção deles serão descritas nos próximos itens.

3.2. Dosagem das misturas

Para a produção dos concretos, foram consideradas cinco frações volumétricas de serragem, sendo 15%, 25%, 35%, 45% e 55% que equivalem as relações cimento/madeira (26,03-10,97-6,05-3,55-1,99). Considerando a influência da água na resistência de materiais à base de cimento, os bioconcretos¹ foram produzidos com fatores água/cimento de 0,25.

Para determinar a dosagem ideal, foram consultadas as literaturas previamente pesquisadas. Concluiu-se que, conforme Da Gloria (2015), o aumento da fração

¹ O termo bioconcreto é utilizado nesta pesquisa como uma adaptação conceitual, uma vez que o material estudado trata-se, na verdade, de uma argamassa e não de um concreto. A escolha do termo decorre da ausência de um vocábulo amplamente consolidado para tal na literatura técnica, sendo o termo bioconcreto mais reconhecido e compreendido no contexto de materiais cimentícios com adição de agentes biológicos.

volumétrica de serragem pode resultar em uma redução da resistência das misturas produzidas. No entanto, esse parâmetro não foi considerado como um fator limitante, visto que o objetivo principal deste trabalho é conferir ao material propriedades de isolamento térmico. Assim, quanto maior o volume de serragem incorporado, maior será o isolamento térmico obtido.

De acordo com Da Gloria (2015), a resistência da mistura com uma fração volumétrica de serragem de 50% é próxima à de um bloco de concreto, aproximadamente 2 MPa. Com base nesse resultado, foram adotados os critérios da norma ABNT NBR 6136:2016, estabelecendo-se que a mistura deveria ser dosada para atingir uma resistência mínima entre 2 MPa e 4 MPa. A Tabela 2 apresenta a constituição dos materiais em kg/m³ dos bioconcretos¹.

Às misturas foram dadas as nomenclaturas representadas por BCS, seguido por um número que representa a fração volumétrica de serragem incorporada na mistura. Assim, BCS15 representa um bioconcreto de serragem a uma fração volumétrica de 15%

Tabela 2 – Dosagem dos bioconcretos em kg/m³

Bioconcretos	Serragem	Cimento	Água	Água de Compensação	VMA	Superplastificante	CaCl ₂
BCS15	51,09	1330,07	332,68	35,76	1,33	4,44	39,92
BCS25	106,24	1165,33	291,55	74,37	1,17	3,88	34,96
BCS35	152,92	925,74	231,34	107,04	0,92	3,09	27,76
BCS45	196,76	699,21	174,80	137,77	0,70	2,33	20,97
BCS55	238,15	475,62	134,75	166,71	0,48	1,59	14,25

Fonte: O autor

3.2.1. Determinação da água de compensação

A água de compensação é a quantidade de água adicionada ao concreto para compensar a perda da água constituinte da mistura pela absorção da serragem. O objetivo da água de compensação é garantir que a quantidade de água necessária para a reação química de hidratação do cimento esteja presente no concreto, garantindo a resistência e durabilidade adequadas.

A serragem é um material altamente absorvente e pode absorver uma quantidade significativa de água. A quantidade de água que a serragem pode absorver depende de vários fatores, como o tipo de madeira utilizada, o tamanho da serragem e a densidade dela.

Para este processo, a absorção da serragem foi determinada de forma a misturar 100 gramas do resíduo com 500 gramas de água durante 1 hora em um recipiente de 5 litros pesando por vários intervalos de tempo até chegar a uma constância de peso de massa (com serragem úmida).

Após esse processo, a serragem foi colocada em uma peneira para escoar a água durante 5 minutos. Por fim, a serragem úmida foi pesada com o objetivo de determinar a água de absorção conforme a Equação 1, a seguir.

$$A_{comp} = \frac{ms - m}{m} \times 100$$

Equação 1, onde:

A_{comp} : água de compensação da serragem (%);

ms : massa de serragem úmida (g);

m : massa de serragem seca (g).

3.2.2. Moldagem

Antes da moldagem a serragem foi pesada, saturada em água por 1h para evitar a absorção da água de hidratação do cimento.

Para a produção dos corpos de prova destinados à determinação de resistência à compressão e massa específica foram utilizadas uma betoneira com capacidade de 150L para as misturas de 15%, 25% e uma betoneira com capacidade de 400L (Figura 18) para as misturas de 35%, 45% e 55%, previamente imprimida com a mistura de mesmo traço que o bioconcreto a ser produzido, de forma a inserir os materiais posteriormente.

Figura 18 – Betoneira de 150L e 400L utilizada para a preparação dos bioconcretos



Fonte: O autor

Na produção das misturas dos bioconcretos, a sequência do processo de mistura consistiu em:

- Mistura previa da água e do cloreto de cálcio (em recipiente);
- Lançamento do cimento, da serragem e metade da água na betoneira, misturando-os por 1 minuto para iniciar as primeiras reações entre o cimento, a água e o acelerador de pega;
- Parada de 30 segundos para retirada de cimento retido na betoneira;
- Mistura por 5 minutos;
- Lançamento do restante da água, do agente modificador de viscosidade e do superplastificante;
- Mistura por 5 minutos;
- Parada de 30 segundos para retirada de material retido na betoneira;
- Mistura por 1 minuto.

O procedimento total durou 13 minutos.

Ao término da mistura, os bioconcretos frescos foram distribuídos em três camadas dentro de moldes previamente lubrificados com lubrificante. Cada camada foi compactada manualmente com o auxílio de uma haste. Após a compactação da última camada, os corpos de prova foram submetidos à vibração mecânica em uma mesa vibratória.

Após este procedimento, foram moldados quinze corpos de prova para cada fração volumétrica de forma a utilizá-los nos ensaios físicos e mecânicos, que após a desforma foram levados para cura em câmara úmida. A moldagem dos painéis será apresentada no item 3.4.3.

3.3. Desenvolvimento Execução dos painéis de bioconcreto para ensaios térmicos

Foram moldados três painéis de bioconcreto com frações volumétricas de 35%, 45% e 55%, tendo em vista que o objetivo principal é analisar a influência do resíduo de madeira na eficiência térmica dos painéis. Os painéis moldados possuem dimensões de 0,80 x 0,60 x 0,10 m (Figura 19).

Figura 19 – Fôrma produzida para a fabricação dos bioconcretos



Fonte: O autor

A moldagem dos painéis foi realizada em fôrmas compostas por placas de compensado naval de 2cm de espessura. A fôrma utilizada apresenta base dupla, na qual foram fixados pregos para melhor aderência do concreto à base após a desforma, possibilitando a movimentação dos painéis sobre os carrinhos da câmara térmica. Além disso, foram feitas gravatas das fôrmas durante a concretagem, e utilizou-se desmoldante próprio para fôrmas em madeira nas faces internas.

Internamente, cada painel possuía uma armadura, tendo como base a taxa de armadura mínima baseada na NBR 16055 (ABNT, 2022), que se refere a requisitos e procedimentos as paredes de concreto moldadas in loco, conforme **XXXXX**. Foram confeccionadas armaduras contornando a seção transversal do painel, gerando um total de 4 barras horizontais em cada uma das maiores faces. Ao longo da altura do painel e fixadas nas barras horizontais foram posicionadas 6 barras verticais por face. As barras horizontais e verticais possuíam dimensões iguais a 0,78m e 0,55m, respectivamente. Foram utilizados espaçadores para garantir a distância entre a armadura e as faces internas das fôrmas.

As fôrmas foram moldadas em três camadas e adensadas com um martelo de borracha. Em seguida, os painéis permaneceram em cura, tendo sido desformados dentro de cerca de dois dias antes da realização do ensaio.

3.4. Propriedades Mecânicas

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados no LEMC (FAU/UFRJ), com 4 corpos de prova cilíndricos de cada amostra de bioconcreto de dimensões iguais a 100mm de diâmetro x 200mm de altura, utilizando uma prensa hidráulica servocontrolada, conforme Figura 20, de acordo com a norma NBR 5739 (ABNT, 2018), a uma velocidade com controle a uma taxa de 0,05mm/min. Os bioconcretos foram avaliados em 3 idades diferentes: 1 dia, 7 dias e 28dias.

Figura 20 – Equipamento que será utilizado para o ensaio de resistência a compressão



Fonte: O autor

3.5. Propriedades Físicas

3.5.1. Estado Fresco

O teste de consistência do concreto tem como objetivo principal verificar se o método de dosagem adotado corresponde ao material efetivamente produzido, assegurando que a mistura apresente espalhamento homogêneo e baixa exsudação. Para isso foram feitos ensaios de abatimento de tronco de cone de acordo com a norma ABNT NBR 16889:2020 para cada uma dos bioconcretos produzidos.

3.5.2. Estado Endurecido

O ensaio para a obtenção dos valores de massa específica foi realizado segundo a NBR 9778 (ABNT 2005), no LEMC (FAU/UFRJ). O estudo compreendeu as seguintes etapas:

inicialmente foi necessário fazer a secagem em estufa afim de obter o controle de massa dos corpos de prova; após o primeiro procedimento foi feita a saturação; em seguida à fervura por um período de 5 horas e imediatamente foi-se necessário a obtenção do peso em estado “saturado superfície seca” e, por fim, a pesagem em balança hidrostática do corpo de prova submerso.

3.6. Propriedades Térmicas

O ensaio térmico foi realizado em uma câmara térmica, projetada e construída por Almeida (2019), tendo como referência Souza (2017). A câmara, de dimensões totais de 1,42x1,04x0,90m, é composta por placas de compensado naval e isolada com placas de poliestireno expandido (EPS) de alta densidade, com 10cm de espessura. A câmara é dividida em três partes: o suporte com rodízio dos painéis (Figura 21-a), a câmara em si com diferentes compartimentos (Figura 21-b) e o módulo de aquecimento (Figura 21-c). A câmara possui duas aberturas superiores de 1cm de diâmetro, nos dois compartimentos laterais opostos, cada uma para a passagem dos sensores de temperatura utilizados durante as aferições.

Figura 21 – (a) Carrinho para suporte dos Painéis; (b) Câmara; (c) Módulo de Aquecimento

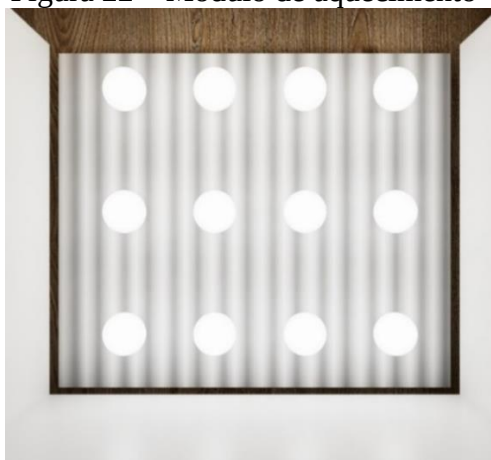


Fonte: O autor

O módulo de aquecimento é acoplado lateralmente à câmara. Também feito em compensado naval, é revestido internamente por folhas de papel alumínio, com o objetivo de tornar a distribuição de calor, transmitida pelas lâmpadas, uniforme. Neste módulo podem ser acopladas até 12 (doze) lâmpadas, separadas em 4 (quatro) circuitos controlados por dimmers (Figura 22). Para o ensaio, foram utilizadas duas lâmpadas

halógenas de 70W. A fonte de calor encontra-se a uma distância de 65cm em relação ao painel utilizado nos ensaios.

Figura 22 – Módulo de aquecimento



Fonte: O autor

Em relação ao suporte com rodízio, ele é inserido, internamente, na região central da câmara, funcionando como uma divisória, separando assim a câmara em dois ambientes, sendo um deles para simulação do meio externo, onde está localizado o módulo de aquecimento (Ambiente 2), e o outro simulando o ambiente interno de uma edificação (Ambiente 1), conforme Figura 23. A base do suporte com rodízio é composta por placas de compensado naval, placa de EPS e rodízios para que se mantenha a altura relativa entre os demais compartimentos da câmara.

Figura 23 – Setores da Câmara Térmica: Módulo de Aquecimento e Painel Divisor

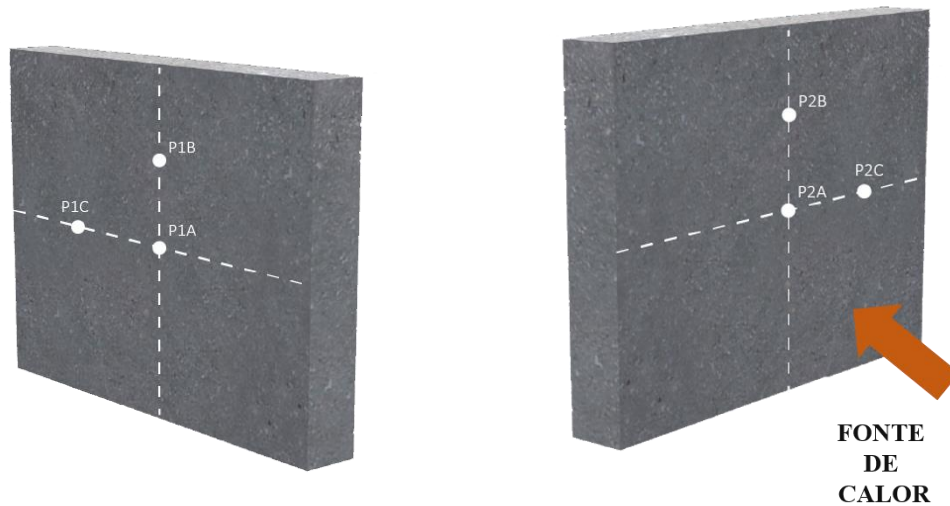


Fonte: O autor

Os painéis foram expostos ao calor através do módulo de aquecimento, com sensores de temperatura nas faces internas e externas dos painéis. Além disso, sensores de

temperatura do ar ambiente foram posicionados em ambos os setores dentro da câmara e no ambiente exterior à câmara (Figura 24).

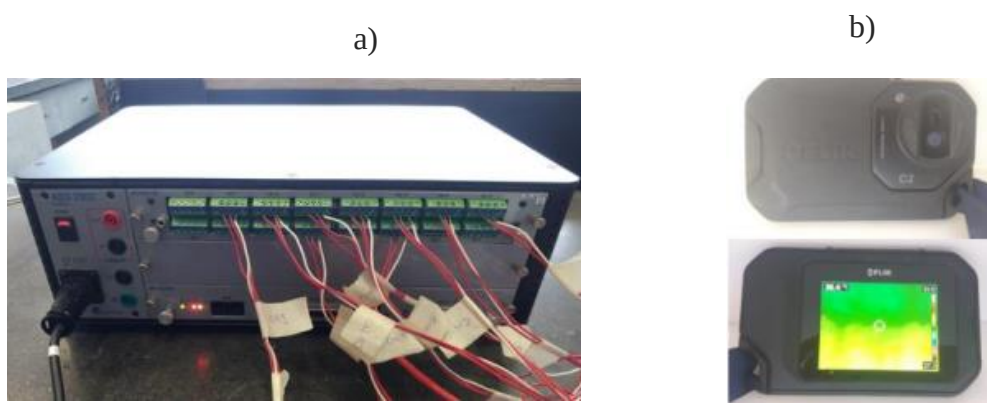
Figura 24 – Setores da Câmara Térmica: Módulo de Aquecimento e Pannel Divisor
Face para ambiente 1 Face para ambiente 2



Fonte: O autor

Para registrar as informações, o sistema de aquisição utilizou-se dois equipamentos principais: Lynx e câmara termográfica, conforme ilustrado na Figura 25. Por fim, o experimento durou 10 horas, com 7 horas de aquecimento (lâmpadas acesas) e 3 horas com resfriamento (lâmpadas apagadas).

Figura 25 – (a) Lynx; (b) Câmera Termográfica



Fonte: O autor

A seguir, serão apresentadas as especificações técnicas de cada equipamento e sensor utilizado:

- Lynx: O sistema de aquisição de dados Lynx é uma solução para coleta de dados em tempo real em diversas aplicações, tais como controle de processos industriais, monitoramento ambiental, automação de testes e análise de desempenho de equipamentos. O sistema de coleta de informações utilizado é o modelo AI2164, da marca Lynx, que possui 16 canais e é calibrado para uso com sensores de temperatura PT100. Para a extração dos dados, é utilizado o software AqDados 7.02, fornecido pelo fabricante.
- Câmera termográfica: É um dispositivo que detecta e mede a radiação infravermelha emitida pelos objetos. Ela pode ser usada para medir a temperatura de objetos em tempo real e produzir uma imagem térmica. O sistema de aquisição de dados de uma câmera termográfica é composto por vários componentes. Para o ensaio térmico foi utilizada uma câmera modelo C2 da marca FLIR, que teve como finalidade registrar a temperatura e a distribuição do calor na face dos painéis, bem como verificar as trocas de calor entre a câmara e o ambiente externo. Esta câmera é capaz de realizar leituras na faixa de -10°C a 150°C.

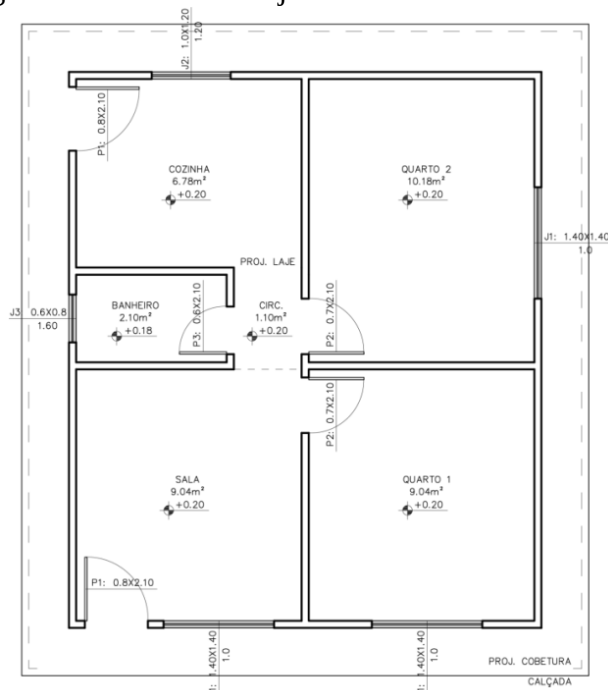
A Lynx foi utilizada juntamente com os sensores do tipo PT 100, responsáveis por medir a temperatura das superfícies dos painéis, a temperatura do ar nos setores da câmara e a temperatura do ambiente externo. As medições de temperatura realizadas por esse equipamento foram feitas a cada 5 segundos (5 Hz). Importante informar que todos os termômetros PT100 foram calibrados para a realização dessa pesquisa.

3.7. Simulação Computacional

3.7.1. Tipologia Habitacional Analisada

A tipologia habitacional analisada corresponde a um dos modelos representativos de habitações de padrão de Habitação de Interesse Social (HIS) unifamiliar, correspondente a casas populares do programa Minha Casa Minha Vida, da Caixa Econômica Federal, lançado em janeiro de 2007, em Vitória (Espírito Santo), conforme estudado por Silva e Reyes (2023). Na Figura 26 pode ser vista a planta da Habitação Unifamiliar escolhida para a simulação.

Figura 26 – Planta do objeto de estudo a ser analisado



Fonte: O autor

O objeto de estudo analisado apresenta dois dormitórios, um banheiro, sala e cozinha, totalizando uma área de 42 m². A Tabela 3 apresenta algumas especificações básicas do projeto.

Tabela 3 – Características de Projeto da Edificação em Estudo

Componentes		Dimensões
Janelas	Sala (2 folhas de correr)	1,40x1,40m (Fator de Ventilação 0,45)
	Quartos (2 folhas de correr)	1,40x1,40m (Fator de Ventilação 0,45)
	Cozinha (2 folhas de correr)	1,20x1,20m (Fator de Ventilação 0,45)
	Banheiro (báscula)	0,60x0,80m (Fator de Ventilação 0,45)
Portas	Entrada – Sala (porta em madeira)	0,80x2,10m
	Quartos (porta em madeira)	0,70x2,10m
	Cozinha (porta em madeira)	0,80x2,10m
	Banheiro (porta em madeira)	0,60x2,10m
Pé direito		2,60m

Fonte: Adaptado do projeto legal fornecido pela CEF

3.7.2. Métodos da simulação e da modelagem

As análises foram conduzidas com base no método de simulação, considerando os parâmetros de desempenho definidos pela NBR 15575 (2021) nos níveis mínimo,

intermediário e superior, e a classificação por equivalência da INI-R (2022) nas categorias A, B, C, D e E. Para a avaliação dos dados, foi aplicado o método de comparação entre um modelo real e um modelo de referência, seguindo os critérios estabelecidos pela NBR 15575 (2021).

Como resultados, foram solicitados a temperatura operativa máxima (T_{Omáx}), o percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa (PHFT) e a carga térmica de resfriamento (CgTR) para cada área de permanência prolongada (APP). A carga térmica de aquecimento (CgTA) não foi calculada, pois a cidade do Rio de Janeiro se encontra na zona bioclimática 8 e para tal não é necessária. Assim, a carga térmica total (CgTT) corresponde exclusivamente à carga térmica de resfriamento.

Sendo assim, para o cálculo do percentual de horas ocupadas em uma faixa de temperatura operativa (PHFT) foi utilizada a Equação 2, a seguir:

$$\text{Equação 2: } PHFT_{app} = \frac{Nhft}{Nhocup} \cdot 100$$

Onde:

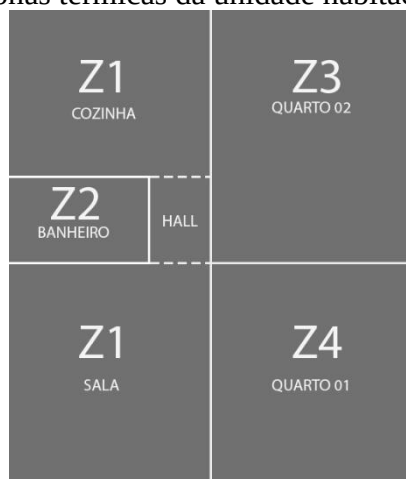
PHFTAPP é o percentual de horas ocupadas do APP dentro da faixa de temperatura operativa (%).

NhFT é o número de horas em que o APP se encontra ocupado e com temperaturas operativas dentro da faixa de temperatura operativa.

NhOcup é o número de horas em que o APP é ocupado ao longo do ano, equivalente a 2920 horas para salas e 3650 horas para dormitórios.

Para a aplicação do método de simulação, cada ambiente das unidades habitacionais (UH) foi modelado como uma zona térmica. A habitação unifamiliar utilizada resultou em quatro zonas térmicas (Figura 27) – Sala e cozinha, quarto 1, quarto 2 e banheiro. Contudo, apenas os cálculos referentes aos ambientes de permanência prolongada (APPs) foram considerados, ou seja, as zonas térmicas Z1, Z3 e Z4.

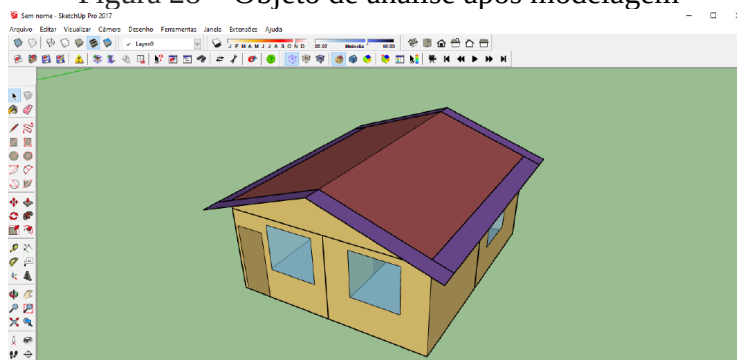
Figura 27 – Zonas térmicas da unidade habitacional analisada



Fonte: O autor

Na Figura 28 podemos verificar o objeto de análise finalizado com que diz respeito a modelagem.

Figura 28 – Objeto de análise após modelagem



Fonte: O autor

3.7.3. Parâmetros da simulação

As simulações computacionais foram realizadas utilizando o programa EnergyPlus na versão 9.7. Para a modelagem da tipologia habitacional analisada, foram utilizados o plug-in Euclid, integrado ao SketchUp 2017, e o AutoCAD 2024. Ademais, foi utilizado um arquivo climático da estação meteorológica do Aeroporto Tom Jobim, correspondente à Zona Bioclimática 8 (ZB8), referente à cidade do Rio de Janeiro, escolhido tanto por sua disponibilidade quanto por ser o mais atualizado e conter uma série histórica mais abrangente de dados coletados.

Os dados de entrada considerados incluíram o padrão de ocupação, a taxa metabólica, o uso de ventilação natural e do sistema de iluminação, as cargas internas dos equipamentos e a densidade de potência instalada (DPI), a seguir. Adicionalmente, conforme

estabelecido na norma NBR 15575 (ABNT, 2021), já que o modelo de simulação computacional da INI-R (BRASIL, 2022) é fundamentado nesse método, o padrão de ocupação considera duas pessoas por dormitório, com a sala sendo compartilhada por todos os moradores, totalizando quatro pessoas por unidade habitacional. Esses valores são representados pela porcentagem de ocupação de cada ambiente ao longo do dia, seguindo padrões distintos para dias de semana e finais de semana, conforme indicado na Tabela 4. As taxas de metabolismo utilizadas na simulação foram de 108 W/pessoa na sala e cozinha e de 81 W/pessoa nos dormitórios. Para o cálculo da temperatura do solo, foi utilizado o processador Slab, devido à sua integração com o programa EnergyPlus.

Tabela 4 – Padrão de Ocupação para dias de semana e final de semana

Horário	Ocupação		
	Dormitório (%)	Sala (%)	Uso misto (%)
00:00 - 00:59	100	0	100
01:00 – 01:59	100	0	100
02:00 – 02:59	100	0	100
03:00 – 03:59	100	0	100
04:00 – 04:59	100	0	100
05:00 – 05:59	100	0	100
06:00 – 06:59	100	0	100
07:00 – 07:59	100	0	100
08:00 – 08:59	100	0	0
09:00 – 09:59	0	0	0
10:00 – 10:59	0	0	0
11:00 – 11:59	0	0	0
12:00 – 12:59	0	0	0
13:00 – 13:59	0	0	0
14:00 – 14:59	0	50	50
15:00 – 15:59	0	50	50
16:00 – 16:59	0	50	50
17:00 – 17:59	0	50	50
18:00 – 18:59	0	100	100
19:00 – 19:59	0	100	100
20:00 – 20:59	0	100	100
21:00 – 21:59	0	100	100
22:00 – 22:59	100	0	100
23:00 – 23:59	100	0	100

Fonte: Adaptado da NBR 15575 (2021)

A INI-R também estabelece o padrão de uso da iluminação, que deve ser considerado apenas para os ambientes de permanência prolongada (APPs), conforme os critérios definidos para dias úteis e finais de semana, descritos na Tabela 5. Um valor de 100% indica que a iluminação do ambiente está em uso, enquanto 0% indica que está desligada.

A densidade de potência instalada de iluminação é de 5 W/m² para todos os ambientes. As cargas internas de equipamentos devem ser modeladas apenas para a sala, com uma potência instalada de 120, mantida durante as 24 horas do dia ao longo de todo o período de simulação.

Tabela 5 – Padrões de uso do sistema de iluminação artificial dos APP

Horário	Iluminação		
	Dormitório (%)	Sala (%)	Uso misto (%)
00:00 - 00:59	0	0	0
01:00 - 01:59	0	0	0
02:00 - 02:59	0	0	0
03:00 - 03:59	0	0	0
04:00 - 04:59	0	0	0
05:00 - 05:59	0	0	0
06:00 - 06:59	100	0	100
07:00 - 07:59	100	0	100
08:00 - 08:59	0	0	0
09:00 - 09:59	0	0	0
10:00 - 10:59	0	0	0
11:00 - 11:59	0	0	0
12:00 - 12:59	0	0	0
13:00 - 13:59	0	0	0
14:00 - 14:59	0	0	0
15:00 - 15:59	0	0	0
16:00 - 16:59	0	100	100
17:00 - 17:59	0	100	100
18:00 - 18:59	0	100	100
19:00 - 19:59	0	100	100
20:00 - 20:59	0	100	100
21:00 - 21:59	0	100	100
22:00 - 22:59	100	0	100
23:00 - 23:59	100	0	100

Fonte: Adaptado da NBR 15575 (2021)

A modelagem do sistema de ventilação natural também é definida pelo INI-R, com base na NBR 15575 (2021), determinando que todos os ambientes da unidade habitacional (UH) com aberturas para ventilação, incluindo aqueles que não são de permanência prolongada, devem ser considerados no sistema de ventilação natural, independentemente de essas aberturas serem portas ou janelas.

Para a tipologia analisada, que apresenta uma geometria linear, os coeficientes de pressão superficial (CP) são estimados pelo próprio EnergyPlus, que calcula esses valores utilizando a equação de Swami e Chandra (1988), a qual determina o CP médio para edificações baixas com formato retangular. O INI-R também define os valores para o

coeficiente de descarga (CD) e o coeficiente de fluxo de ar por frestas (CQ) em janelas e portas retangulares, sendo respectivamente 0,6 (adimensional) e 0,002 kg/sm, além do expoente do fluxo de ar, que deve ser de 0,59 para as portas e 0,63 para as janelas (adimensional).

A temperatura do solo foi determinada por meio do pré-processador Slab, conforme indicado no INI-R, seguindo o procedimento descrito por Sorgato (2009). Inicialmente, foi realizada uma simulação preliminar utilizando os valores de temperatura do solo fornecidos no arquivo climático, obtendo-se como resultado a temperatura média mensal do ar de cada APP em contato com o solo. Em seguida, foi calculada a média ponderada dessas temperaturas com base nas áreas dos APPs, e esses valores foram inseridos no Slab para o cálculo da temperatura do solo. O processo foi repetido três vezes, substituindo os valores obtidos a cada rodada, até que a temperatura do solo estabilizasse nos resultados finais.

Além dos parâmetros mencionados anteriormente, para a realização das simulações computacionais é necessário inserir os valores das propriedades termofísicas dos materiais que compõem a envoltória da edificação. Sendo assim, a simulação foi conduzida em duas etapas distintas. Na primeira etapa, foram utilizados dados provenientes da literatura, conforme apresentados na Tabela 6. Na segunda etapa, foram incorporados dados obtidos experimentalmente, cujos resultados detalhados encontram-se no capítulo de resultados.

Embora a fonte dos dados esteja indicada na legenda da Tabela 6, é importante ressaltar que ela apresenta exclusivamente os dados extraídos da literatura, utilizados na primeira fase da simulação. Os dados experimentais, por sua vez, são discutidos posteriormente, proporcionando uma análise comparativa entre os valores teóricos e os obtidos experimentalmente.

Os valores de absorptância adotados seguiram as recomendações da NBR 15575 para simulações com cores claras ($\alpha = 0,3$). Não foram realizadas simulações para cores média ($\alpha = 0,5$) e escuras ($\alpha = 0,7$), pois essa variação poderia impactar negativamente os resultados, comprometendo a análise da real influência da constituição da envoltória.

No que se refere aos dados dos bioconcretos, destaca-se que são dados de difícil obtenção na literatura. Os valores apresentados de condutividade, densidade equivalente e calor específico foram calculados a partir de dados individuais de cada uma dessas

propriedades seja para argamassa cimentícia, seja para serragem, considerando as diferentes proporções entre cimento/serragem em cada mistura. Mesmo para os valores individuais de serragem, são raros os trabalhos que possuem esses valores.

Tabela 6 – Propriedades dos Materiais nas Simulações

Elementos	Espessura Equivalente (m)	Condutividade (W/mK)	Densidade Equivalente (kg/m ³)	Calor Específico (J/kgK)	Transmitância (U) [W/(m ² ·K)]	Capacidade térmica (C) [kJ/(m ² ·°)]
Telha Cerâmica	0,02	1,00	1800	920	2,01	273
Laje de Concreto (10cm)	0,10	1,75	2400	1000	3,74	240
Porta em Madeira	0,03	0,12	400	2300	1,20	92
BCS35	0,10	0,7747	1452,50	1455	3,34	211,30
BCS45	0,10	0,6646	1267,50	1585	3,12	200,90
BCS55	0,10	0,5545	1082,50	1715	2,85	185,60

Fonte: Calculados de acordo com a NBR 15220 (ABNT, 2022), Anexo V do RAC (BRASIL, 2013) e Ordenes *et al*, (2003)

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

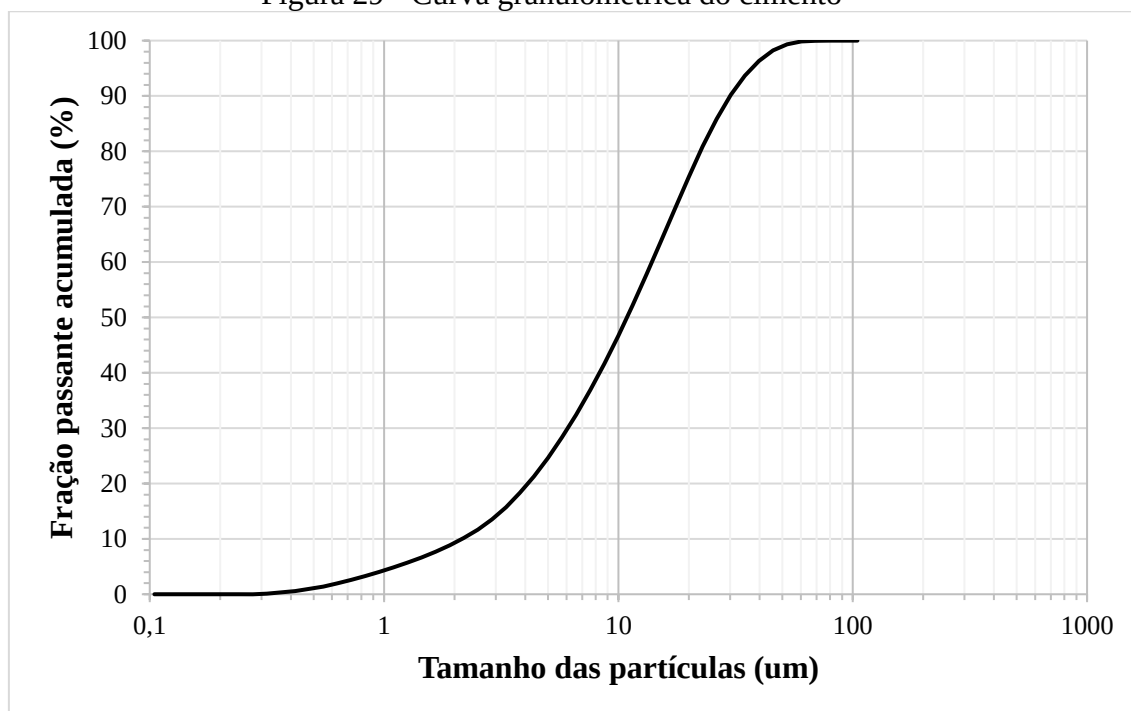
Seguindo a ordem de apresentação do capítulo anterior, o presente capítulo terá os resultados de caracterização dos materiais, bem como os resultados obtidos de resistência à compressão e massa específica dos bioconcretos. No que se refere ao entendimento do comportamento termoenergético, também serão apresentados os dados via análise do ensaio da câmara térmica e avaliação via simulação computacional.

4.1. Caracterização dos materiais

4.1.1. Cimento Portland

A distribuição granulométrica está apresentada na Figura 29 e indica que 95% dos grãos de cimento são menores que 30 μm , sendo 50% maiores que 15 μm . Adicionalmente de acordo com o ensaio de massa específica, o cimento apresentou um valor de 3,07 g/cm^3 .

Figura 29 - Curva granulométrica do cimento



Fonte: O autor

4.1.2. Serragem de madeira

A Figura 30 apresenta a porção de serragem retirada em cada um dos diâmetros da peneira durante o ensaio de granulometria.

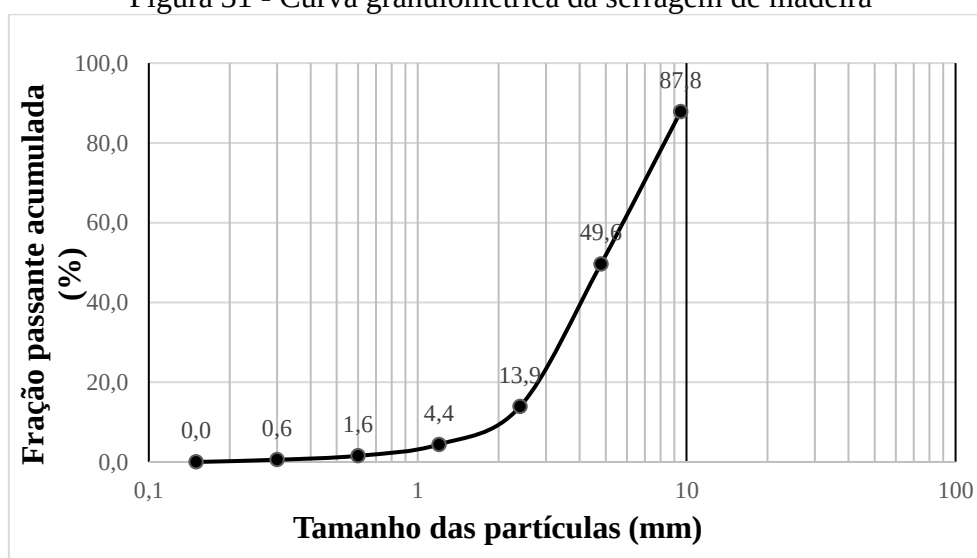
Figura 30 - Serragem separada



Fonte: O autor

Conforme a curva granulométrica mostra, corroborada pela imagem da Figura 31, em torno de 50% das lascas de serragem ficam retidas na peneira 4,8mm.

Figura 31 - Curva granulométrica da serragem de madeira



Fonte: O autor

Os resultados referentes à umidade da serragem, bem como sua massa específica e capacidade de absorção, são apresentados na Tabela 7, a seguir.

Tabela 7 – Propriedades físicas da serragem

Umidade (%)	Massa específica (g/cm ³)	Absorção (%)
14,71	0,433	71,33

Fonte: O autor

A umidade encontrada na serragem foi de 14,71%, o que indica que o material ainda contém uma quantidade significativa de água em sua composição. Esse dado é bastante relevante, já que o teor de umidade interfere diretamente na resistência e na vida útil da madeira, além de ser importante para definir os processos de secagem e armazenamento

adequados. O resultado obtido sugere que a serragem foi coletada em condições naturais, sem ter passado por nenhum tratamento especial para reduzir sua umidade.

Em relação a massa específica, foi observada uma média de $0,433 \text{ g/cm}^3$, o que indica que a serragem contém uma quantidade considerável de água em sua composição. Como era de se esperar, a serragem, por ser um material cheio de fibras e poros, apresenta uma densidade menor do que a madeira sólida de $0,608 \text{ g/cm}^3$ (Ramos *et al.*, 2024).

Por fim, a taxa de absorção foi de 71,33%. Esse comportamento é particularmente relevante no contexto do presente estudo, pois influencia diretamente a quantidade de água de compensação necessária durante o processo de mistura. A absorção significativa de água pela serragem pode reduzir a disponibilidade de água livre na matriz, afetando a trabalhabilidade e o desempenho final do compósito. Portanto, compreender a relação entre a absorção da serragem e a água de compensação é essencial para otimizar as proporções dos materiais e garantir as propriedades desejadas no produto final.

4.1.3. Superplastificante

A Figura 32 apresenta os resultados do ensaio de compatibilidade entre o cimento e o superplastificante do tipo Glenium 51.

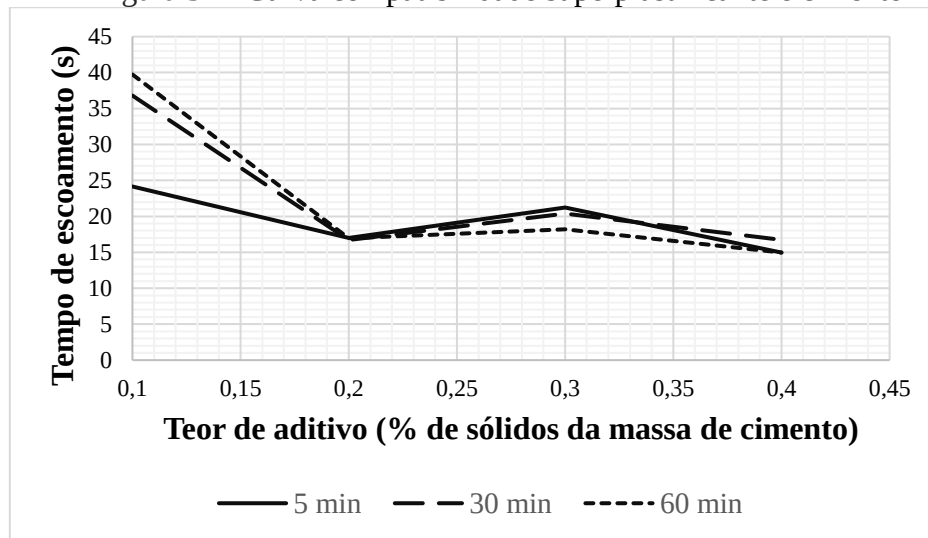
Observa-se que, inicialmente, com o aumento do teor de aditivo, o tempo de escoamento diminui, especialmente até cerca de 0,2% de teor de aditivo. Este comportamento é mais evidente para o tempo de escoamento de 5 minutos.

A partir de 0,2% de teor de aditivo, a curva se estabiliza, indicando que a adição de mais superplastificante não gera alterações tão expressivas no tempo de escoamento. Esse efeito também é visível nas curvas para 30 minutos e 60 minutos. Ao comparar as diferentes respostas, fica claro que o comportamento do superplastificante no cimento é mais estável, seja com 5min, 30 ou 60min. Esse comportamento indica uma melhoria na fluidez da pasta, atribuída à ação dispersante do aditivo sobre as partículas de cimento. A partir desse ponto, a curva de escoamento tende à estabilização, sugerindo que teores superiores de aditivo não proporcionam ganhos adicionais expressivos na trabalhabilidade. Além disso, pode-se sugerir que, após um tempo de aplicação, o efeito do superplastificante no aumento da fluidez tende a se reduzir, o que é um comportamento esperado em processos de endurecimento de materiais cimentícios.

Em termos de aplicação prática, esses resultados indicam que a dosagem do superplastificante precisa ser otimizada, já que a adição excessiva pode não gerar

benefícios adicionais e pode até mesmo resultar em um aumento no custo do material sem vantagens significativas em termos de desempenho.

Figura 32 - Curva compatibilidade superplastificante e cimento



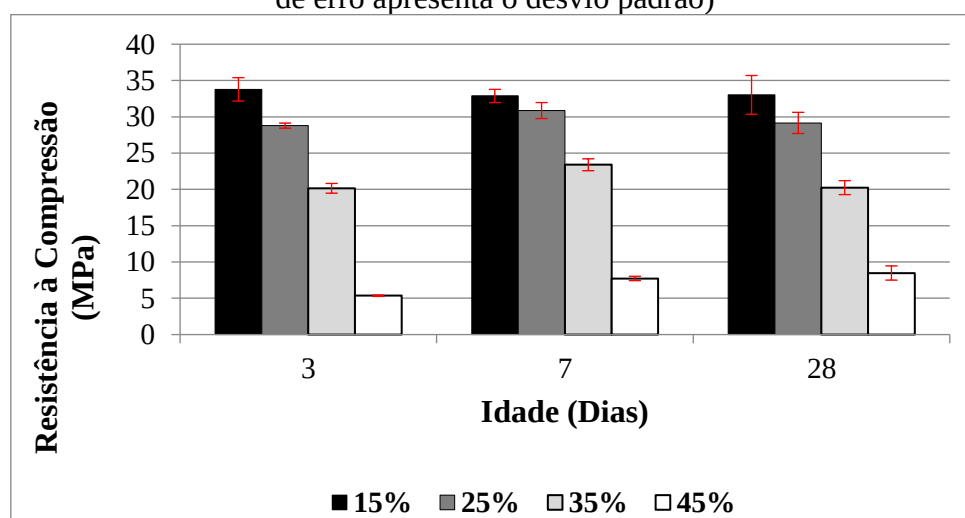
Fonte: O autor

4.2. Propriedades dos Bioconcretos

4.2.1. Propriedades Mecânicas

Os bioconcretos de madeira foram avaliados quanto ao seu comportamento mecânico sob compressão após o período de 3, 7 e 28 dias de cura em câmara úmida. Todos os dados estão apresentados de forma organizada na Figura 33, permitindo uma análise mais detalhada do comportamento mecânico dos compósitos. Os resultados são referentes à média de quatro corpos de prova por mistura. Os resultados, na Figura 33, também são apresentados com os respectivos desvios padrões das misturas.

Figura 33 – Evolução da resistência à compressão dos bioconcretos produzidos (barra de erro apresenta o desvio padrão)



Fonte: O autor

O gráfico ilustra que para os 3 dias de idade, a mistura com 15% de serragem (BCS15) alcançou a maior resistência, com valores de cerca de 33 MPa, enquanto as misturas com 25%, 35% e 45% de serragem apresentaram uma resistência mais baixa, variando de 28 MPa a 5 MPa, respectivamente. Para os 7 dias, comportamento similar foi observado. A mistura com 15% de serragem apresenta a maior resistência à compressão, enquanto a de 45% continua com a resistência mais baixa. Entretanto a redução no valor de resistência à compressão entre as misturas BCS45 e BCS15, aos 7 dias, da ordem de 78% foi menor que a redução obtida aos 3 dias, entre as mesmas misturas, que foi da ordem de 85%. No que se refere a idade de 28 dias, também foi observada redução nos valores de resistência à compressão, com o aumento do teor de serragem, sendo a redução no valor de resistência à compressão entre as misturas BCS45 e BCS15 da ordem de 75%. Esse comportamento pode ser justificado pela menor quantidade de cimento disponível nas misturas com maior teor de serragem, o que prejudica o processo de hidratação e, consequentemente, o ganho de resistência inicial. A presença de serragem em concentrações mais altas interfere negativamente na formação do gel de C-S-H (silicato de cálcio hidratado), essencial para a resistência dos bioconcretos (Da Gloria, 2015). Além disso, o maior teor de serragem incorporado representa uma menor quantidade de cimento que é o material reativo e que fornece resistência, o que faz impactar negativamente as propriedades mecânicas do bioconcreto.

No que se refere ao comportamento das misturas ao longo do tempo, com exceção da mistura BCS15 que praticamente não teve alteração nos valores de resistência à

compressão ao longo da idade, as demais misturas apresentaram ou mantiveram os resultados ou tiveram aumento nos valores de resistência à compressão ao comparar as idades de 3, 7 e 28 dias. Esse aumento na resistência pode ser atribuído ao processo contínuo de hidratação do cimento.

Quanto ao desvio padrão, observa-se uma diminuição no valor da variabilidade entre os resultados à medida que o tempo de cura aumenta, indicando que as misturas se estabilizam com o passar dos dias.

Vale ressaltar que a mistura com 55% de serragem não foi possível de ser testada quanto à resistência à compressão pois, ao aplicar carga na prensa hidráulica, a mistura se desfez imediatamente. Esse comportamento pode ser explicado pela alta proporção de serragem na mistura, que compromete a coesão e a integridade do bioconcreto. A serragem, ao ser adicionada em grandes quantidades, diminui a quantidade de cimento disponível para a formação de ligações estruturais, como o gel de C-S-H (silicato de cálcio hidratado), que é responsável pela resistência e rigidez do material. Com a quantidade excessiva de serragem, o volume de ar entre as partículas de serragem aumenta, resultando em uma mistura mais porosa e frágil. Dessa forma, ao ser submetida à carga de compressão na prensa hidráulica, a estrutura da mistura não foi capaz de suportar a força, levando a sua ruptura imediata.

Logo, conclui-se que os resultados indicam que o uso de serragem em bioconcretos pode ser viável até um limite de 45%, com a resistência à compressão mostrando um bom equilíbrio entre sustentabilidade e desempenho. Para misturas com maior teor de serragem (45% e 55%), a resistência à compressão é comprometida, especialmente nas fases iniciais de cura, o que sugere que essas misturas podem não ser adequadas para aplicações estruturais exigentes sem modificações adicionais no processo de cura ou formulação da mistura.

O equilíbrio entre sustentabilidade e desempenho pode ser analisado considerando a redução do impacto ambiental proporcionada pela reutilização de resíduos da indústria madeireira e a manutenção de propriedades mecânicas adequadas para o uso pretendido.

4.2.2. Propriedades Físicas

4.2.2.1. Estado Fresco

A Tabela 8 apresenta os resultados do abatimento do tronco de cone dos bioconcretos produzidos. Analisando os dados, observa-se uma redução no abatimento com o aumento da quantidade de serragem nas misturas. A mistura BCS15 (15% de serragem) apresentou o maior valor de abatimento, com 130 mm. À medida que a quantidade de serragem aumentou nas misturas, o abatimento foi reduzido progressivamente. A mistura BCS25 (25% de serragem) apresentou 90 mm de abatimento, já a mistura BCS35 (35% de serragem) teve 65 mm.

Tabela 8 - Resultados do ensaio de abatimento do tronco de cone

Misturas	Abatimento (mm)
BCS15	130
BCS25	90
BCS35	65
BCS45	40
BCS55	13

Fonte: O autor

Para as misturas com maior teor de serragem (BCS45 e BCS55) foram observadas reduções, no valor do abatimento, iguais a 69% e 90%, respectivamente, em relação à mistura com menor teor de serragem (BCS15). Esse comportamento é devido à natureza das partículas de serragem, que alteram a capacidade de movimentação da pasta de cimento, justificado por diversas razões relacionadas às propriedades da serragem e sua interação com a pasta cimentícia. O formato irregular das partículas restringe a fluidez da mistura e quanto maior o teor utilizado, maior é a dificuldade de escoamento da mistura.

Além disso, estudos na literatura mostram que as partículas de serragem não se integram tão bem à pasta de cimento quanto os agregados tradicionais, formando uma mistura menos homogênea, o que também pode contribuir para a diminuição do abatimento.

Outro fator que pode contribuir para esse comportamento é a capacidade de retenção de água da serragem. Embora a taxa de absorção de água da serragem tenha sido considerada para a moldagem, não é possível garantir que a serragem não irá absorver água da mistura, por se tratar de um material muito heterogêneo. Assim, ao absorver parte da água disponível na mistura, a serragem reduz a quantidade de água livre necessária para garantir a fluidez, tornando a mistura mais densa e dificultando o seu escoamento.

4.2.2.2. Estado Endurecido

A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos pelo ensaio de absorção total de água por imersão.

Tabela 9 - Valores médios de massa específica, absorção e índice de vazios dos bioconcretos produzidos

Misturas	M.E - CV (kg/m ³) - (%)	ABS - CV (%) - (%)	IV - CV (%) - (%)
BCS15	2205,25 - 3,05	5,60 - 14,50	10,98 - 13,31
BCS25	2018,03 - 0,12	8,31 - 6,21	14,36 - 5,38
BCS35	1825,03 - 0,12	13,07 - 7,36	19,26 - 6,54
BCS45	1617,61 - 3,09	31,11 - 4,01	33,46 - 2,82

Fonte: O autor

Observando a massa específica (M.E.), verifica-se uma tendência de diminuição à medida que a quantidade de serragem na mistura aumenta. A mistura BCS15 apresentou uma massa específica de 2205,25 kg/m³, enquanto a BCS45 apresentou uma massa específica consideravelmente inferior, de 1617,61 kg/m³. Em comparação à mistura BCS15, as reduções obtidas para as misturas BCS25, BCS35 e BCS45 foram, respectivamente, iguais a 8,5%, 17% e 27%. Isso pode ser explicado pela menor densidade das partículas de serragem, que substituem parte do cimento e e, por isso, reduzem a massa específica da mistura. O desvio padrão reduzido nas misturas, como BCS25 e BCS35, sugere que essas misturas apresentam uma homogeneidade maior.

Quanto à absorção (ABS), observa-se que as misturas com maior quantidade de serragem, como a BCS45, apresentam absorção significativamente mais alta, com valores de 31,11% e 4,01% de desvio padrão, em comparação com a BCS15, que apresentou valores mais baixos de 5,60% e 14,50%. As misturas BCS25, BCS35 e BCS 45 apresentaram incrementos de 48%, 133% e 455%, respectivamente, em relação à mistura BCS15. A maior absorção pode ser explicada pela maior porosidade das misturas com maior teor de serragem, que pode aumentar a capacidade de retenção de água.

O índice de vazios (IV) também segue uma tendência crescente com o aumento da quantidade de serragem. A mistura BCS15 apresentou um índice de vazios de 10,98%, enquanto a BCS45 alcançou 33,46%. As misturas BCS25, BCS35 e BCS 45 apresentaram incrementos de 30,78%, 75,41% e 204,74%, respectivamente, em relação à mistura BCS15. Esse aumento no índice de vazios está relacionado ao maior espaço vazio nas

misturas, possivelmente devido à irregularidade das partículas de serragem, que podem não se compactar adequadamente, resultando em uma maior quantidade de espaços vazios no material.

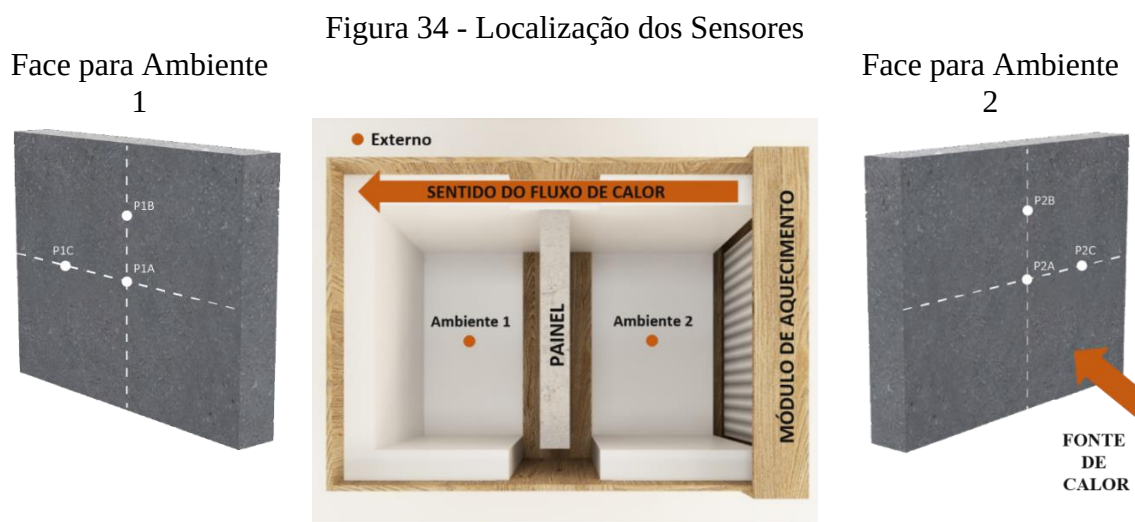
Cabe destacar que a mistura com 55% de serragem (BCS55) não apresentou resultados físicos, pois os corpos de prova se desfizeram ao serem inseridos em água. Isso ocorre devido ao aumento excessivo da quantidade de serragem, que compromete a estabilidade da mistura. A serragem, por ser uma substância orgânica e menos densa, acaba por formar uma mistura com propriedades estruturais fracas, que não resistem à ação da água. Além disso, a alta quantidade de serragem reduz a quantidade de cimento na mistura, que é responsável pela resistência estrutural, o que pode ter levado à desintegração dos corpos de prova.

Em resumo, os resultados indicaram que as misturas com maior teor de serragem apresentaram maior absorção de água e índice de vazios, acompanhados de uma redução significativa na massa específica. Contudo, a mistura com 55% de serragem mostrou-se inviável, uma vez que a amostra se desagregou ao ser imersa em água. Esses resultados sugerem que, embora a adição de serragem reduza a densidade do material, é necessário um equilíbrio adequado entre a quantidade de serragem e a capacidade de aglutinação da mistura para garantir a estabilidade e a resistência física.

4.2.3. Propriedades Térmicas

Conforme apresentado no capítulo anterior, foram produzidos três painéis de bioconcreto de madeira distintos, identificados como BCS35, BCS45, BCS55, os quais foram submetidos a ensaios em uma câmara térmica. Esses ensaios, com duração aproximada de 10 horas, tiveram o módulo de aquecimento em funcionamento durante as primeiras 7 horas. Nesse período, o calor gerado pelas lâmpadas do módulo foi transferido aos painéis por meio de convecção e radiação, provocando o aquecimento do ar e da face do painel voltada para o ambiente 2. Posteriormente, o calor se propagou por condução através do painel, atingindo a face oposta e aquecendo o ar no ambiente 1, também por convecção e radiação. A partir da análise desses ensaios, foi possível observar o fluxo de calor entre os dois ambientes da câmara e calcular os valores de condutividade térmica de cada painel.

As temperaturas registradas pelos sensores serão apresentadas nos gráficos a seguir. Foram considerados apenas os dados dos sensores responsáveis pela medição da temperatura do ar nos ambientes 1 e 2 (Ambiente 1 e Ambiente 2), das temperaturas nas faces dos painéis (P1A, P1B, P1C, P2A, P2B e P2C) e da temperatura do ambiente externo à câmara (Externo), conforme ilustrado na Figura 34.



Fontes: O autor

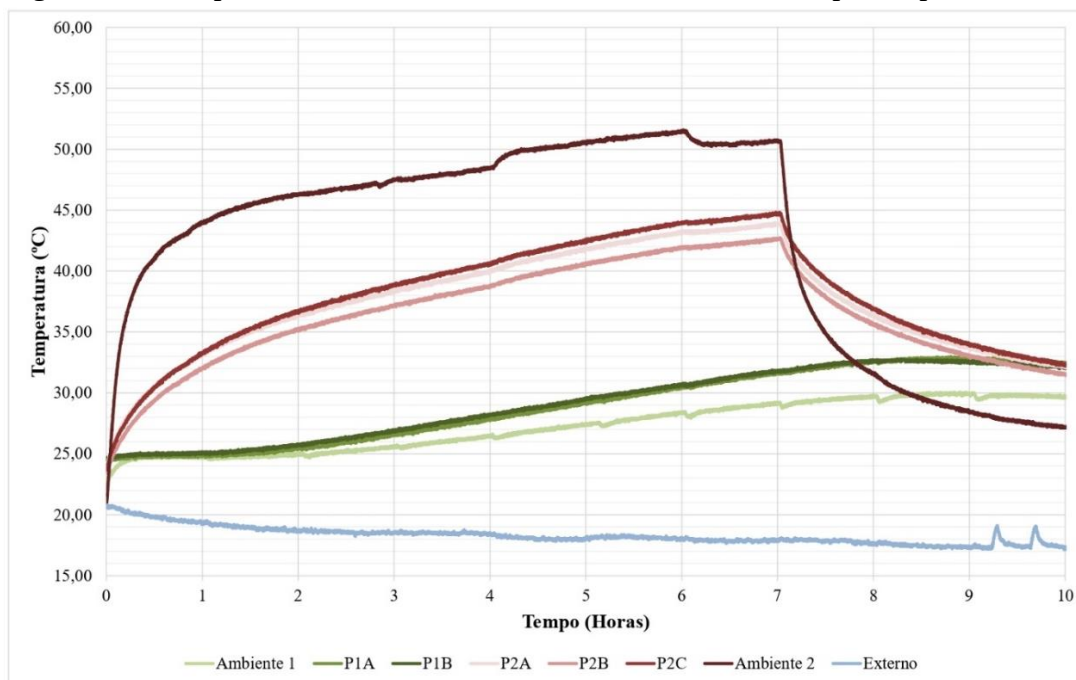
4.2.3.1. Fluxo Térmico

A Figura 35 apresenta os resultados do ensaio do painel BCS35, destacando o comportamento térmico nos diferentes ambientes. Inicialmente, a temperatura registrada foi de aproximadamente 21°C. Durante as duas primeiras horas, a temperatura no Ambiente 2 aumentou rapidamente, atingindo 46°C, e posteriormente estabilizou-se gradualmente, alcançando um pico de 51,6°C após sete horas, quando o módulo de aquecimento foi desligado, iniciando o processo de resfriamento.

No Ambiente 2, mais exposto ao calor, o aumento foi mais intenso, enquanto o Ambiente 1, menos afetado, apresentou aquecimento mais moderado, com temperaturas em torno de 28 °C no mesmo período. O sensor externo, por sua vez, registrou estabilidade térmica, variando em torno de 21°C a 17°C, ao longo das 10 horas de ensaio, demonstrando que as variações térmicas observadas foram essencialmente internas, sem influência significativa do ambiente externo. O sensor de ambiente externo manteve quase uma estabilidade térmica ao longo de todo o ensaio, com temperaturas variando em torno de 20 °C, indicando que a variação térmica no experimento foi majoritariamente interna,

sem influência relevante das condições externas. Vale ressaltar que as curvas P1A e P1B se encontram quase que sobrepostas.

Figura 35 - Temperaturas aferidas durante as 10 horas de ensaio para o painel BCS35



Fonte: O autor

O aquecimento dos sensores posicionados na condição P2 (P2A, P2B e P2C) apresenta uma rápida elevação de temperatura nas primeiras horas de ensaio, atinge valor médio de 32,1°C com duas horas. Durante o período de aquecimento ativo, que se estendeu até 7 horas de ensaio, esses sensores atingiram seus valores máximos iguais a 45°C em P2C, 43°C em P2B e 44°C em P2A. Este comportamento reflete a exposição direta e intensa ao calor, conforme esperado para a configuração de teste.

Por outro lado, os sensores associados às condições P1 (P1A e P1B) demonstraram uma elevação de temperatura mais lenta e gradual. No tempo de sete horas de ensaio, P1A e P1B alcançaram temperaturas igual a 31,5°, evidenciando uma menor influência direta da fonte de calor e maior dissipação térmica.

Com o desligamento da fonte de aquecimento, com 7 horas de ensaio, observa-se uma queda abrupta das temperaturas, mais acentuada nas regiões diretamente expostas (P2 e Ambiente 2). As temperaturas dos sensores que estavam sujeitos a maior aquecimento (P2) apresentaram uma queda rápida, aproximando aos valores de temperatura dos sensores P1. Para o Ambiente 1 o comportamento foi diferenciado. No momento de desligamento das lâmpadas, o ambiente ainda estava em

fase de elevação de temperatura, atingindo o valor máximo somente com 9 horas, ou seja, foi observado um atraso térmico, conforme será apresentado mais adiante.

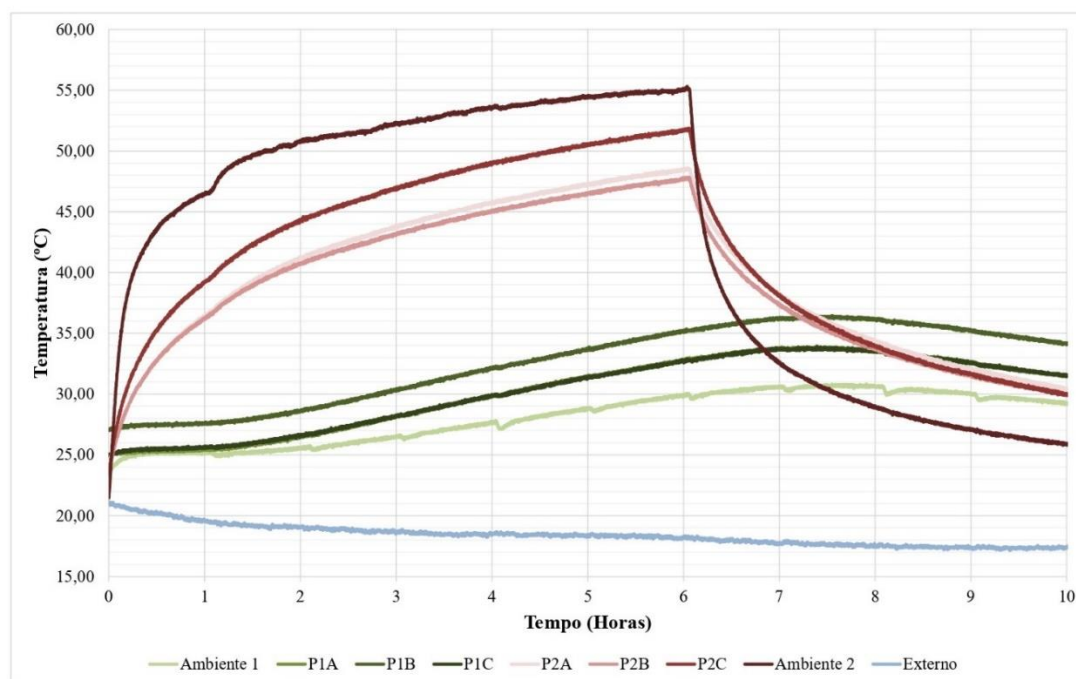
Nota-se ainda que, mesmo duas a três horas após o desligamento do sistema de aquecimento, as temperaturas internas (ambientes e sensores nas superfícies) ainda se mantêm acima da temperatura externa, evidenciando a capacidade de retenção térmica da câmara.

Foi realizado um ensaio térmico também para o painel BCS45, cujos resultados estão apresentados na Figura 36. O ensaio teve início com os sensores registrando cerca de 20°C para o ambiente externo. Seguindo metodologia semelhante aos ensaios anteriores, o módulo de aquecimento foi acionado, provocando o aumento das temperaturas nos diversos pontos monitorados. Vale ressaltar que as curvas P1A e P1B se encontram sobrepostas.

No Ambiente 2, observa-se uma rápida elevação da temperatura nos sensores, alcançando cerca de 50°C com duas horas de ensaio. As temperaturas máximas registradas para os sensores do Ambiente 2 foram de aproximadamente 52°C para o ponto P2C, 48°C para P2B e 47°C para P2A.

Para o Ambiente 1, o aumento da temperatura foi mais gradual, com os sensores atingindo valores máximos de aproximadamente 31°. Especificamente, o sensor P1C apresentou a maior elevação, chegando próximo a 34°C, enquanto os sensores P1B e P1A alcançaram temperaturas de 36,4°C e 33,8°C, respectivamente. O Ambiente 1 apresentou um comportamento mais amortecido em relação ao Ambiente 2, demonstrando maior resistência térmica.

Figura 36 - Temperaturas aferidas durante as 10 horas de ensaio para o painel BCS45



Fonte: O autor

Após 6 horas de ensaio, o módulo de aquecimento foi desligado. A partir deste momento, inicia-se a fase de resfriamento. Observa-se uma queda brusca nas temperaturas do Ambiente 2, enquanto no Ambiente 1 o resfriamento ocorre de forma mais lenta. Esse comportamento evidencia o efeito de inércia térmica, sobretudo nos sensores presentes no Ambiente 1.

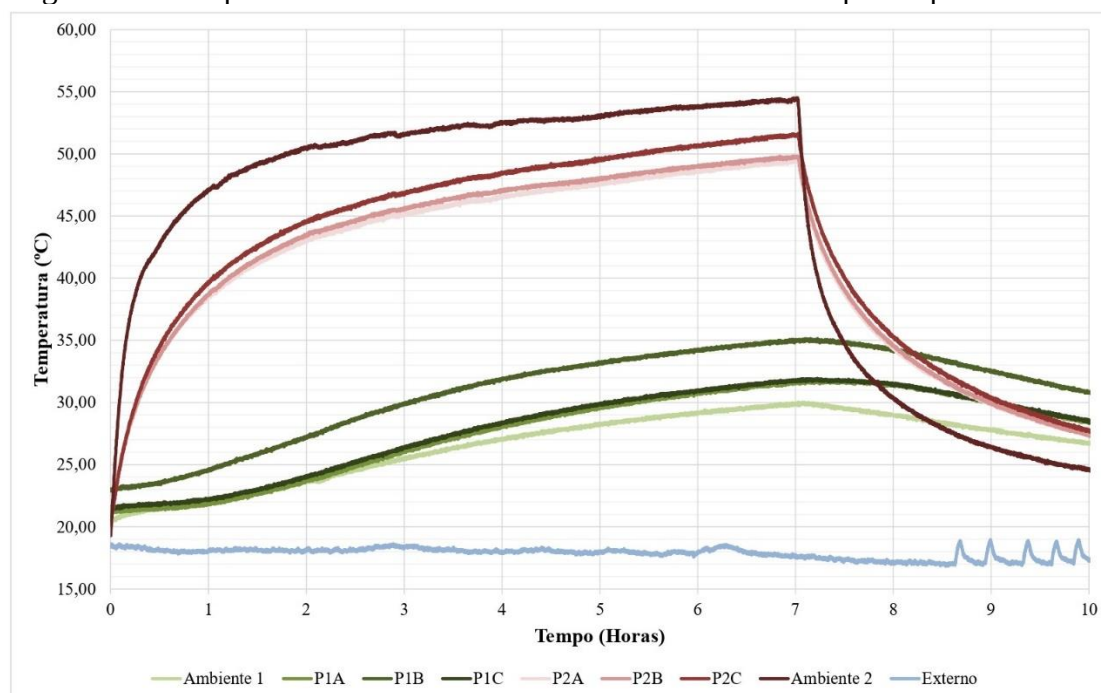
O ambiente externo, monitorado continuamente, manteve variação de temperatura similar ao ensaio realizado para o painel da mistura BCS35

Ao final das 10 horas de ensaio, nota-se que as temperaturas dos sensores internos não retornam aos níveis do ambiente externo, indicando que ainda há calor retido nos sistemas analisados. Além disso, é perceptível que o Ambiente 1 atinge a temperatura máxima depois do Ambiente 2.

As oscilações observadas, principalmente em Ambiente 1, podem estar associadas a momentos de abertura de janelas, o que também foi evidenciado na curva registrada.

Por fim, foi feito o ensaio térmico do painel BCS55. A Figura 37 apresenta os resultados obtidos dos ambientes monitorados. De acordo com as medições dos sensores, a temperatura inicial registrada para o sensor do Ambiente Externo registrando cerca de 19°C. Vale ressaltar que a variação observada ao longo de todo o ensaio foi de apenas 1°C. É importante destacar que as curvas P1A e P1B estão sobrepostas.

Figura 37 - Temperaturas aferidas durante as 10 horas de ensaio para o painel BCS55



Fonte: O autor

Nas primeiras horas, observa-se uma rápida elevação de temperatura nos sensores associados ao Ambiente 2 (linhas em tons de vermelho), com a temperatura média destes atingindo aproximadamente 50°C em cerca de duas horas. Após esse período inicial, a taxa de aumento de temperatura reduz, atingindo valores máximos próximos a 52°C em P2C, 50°C em P2B e 49°C em P2A, com a sétima hora de ensaio. Em seguida, com o desligamento da fonte de calor, similarmente ao observado nos ensaios apresentados anteriormente, a queda foi mais acentuada para os sensores localizados no Ambiente 2 do que para os sensores localizados no Ambiente 1.

Os sensores do Ambiente 1 apresentaram comportamento mais gradual no aquecimento: os sensores denominados P1C, P1B e P1A alcançaram temperaturas máximas entre 31°C e 35°C, com 7 horas de ensaio. Este comportamento indica que o Ambiente 1 sofreu menos influência direta da fonte de calor em comparação ao Ambiente 2, com maior capacidade de amortecimento térmico.

Em relação ao atraso térmico, é possível notar que o Ambiente 1 apresentou um retardo maior na resposta de aquecimento em comparação ao Ambiente 2. Isso significa que o calor demorou mais tempo para afetar significativamente o Ambiente 1, evidenciando maior inércia térmica no sistema de proteção associado a este ambiente.

Na Tabela 10 e na Figura 38, observa-se que a temperatura máxima em Ambiente 1 foi superior no ensaio do Painel BCS35 em comparação com os outros. Acredita-se que essa diferença se deva à maior fração volumétrica de serragem nos painéis BCS45 e BCS55, material com alta resistência térmica, o que dificulta a passagem de calor do Ambiente 2 ao Ambiente 1. Como resultado, o calor fica retido no Ambiente 2, elevando a temperatura nesse ambiente. Vale destacar que esse fenômeno não ocorreria em uma situação real de vedação vertical, sendo observado apenas porque o Ambiente 2 é um compartimento fechado.

Tabela 10 - Temperaturas máximas e temperaturas finais determinadas no ensaio com a câmara térmica para as amostras BCS35, BCS45 e BCS55 (todos os sensores)

Sensores	Temperatura Máxima °C			Temperatura Final °C		
	BCS35	BCS45	BCS55	BCS35	BCS45	BCS55
Ambiente 1	30,84	30,35	30,03	29,69	29,01	26,71
P1A	32,95	33,88	31,74	32,48	31,41	28,36
P1B	32,75	36,45	35,13	32,13	34,08	30,77
P1C	-	33,94	31,93	-	31,43	28,42
Ambiente 2	51,57	53,32	54,50	27,12	25,83	24,57
P2A	43,98	48,59	49,51	32,21	30,30	27,29
P2B	42,71	47,83	49,83	31,55	29,93	27,34
P2C	44,81	51,89	51,63	32,35	29,94	27,65
Externo	20,79	21,13	18,97	17,28	18,57	17,28

Fonte: O autor

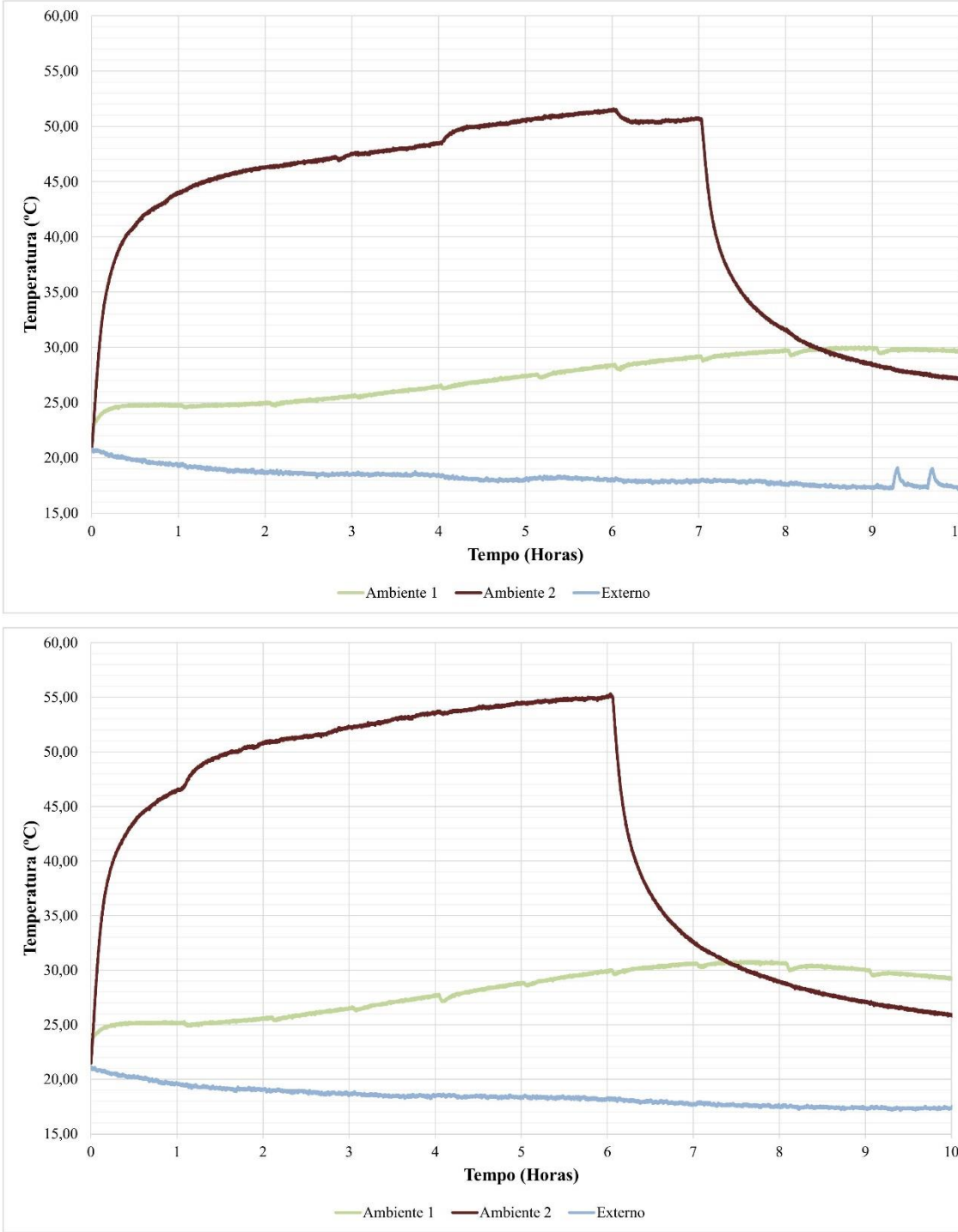
Além disso, as temperaturas máximas no Ambiente 1 são mais baixas no ensaio do painel BCS55 (30,03°C) em relação ao painel BCS45 (30,35°C) e ao painel BCS35 (30,84°C), apesar do Ambiente 2 apresentar temperaturas mais altas no painel BCS55.

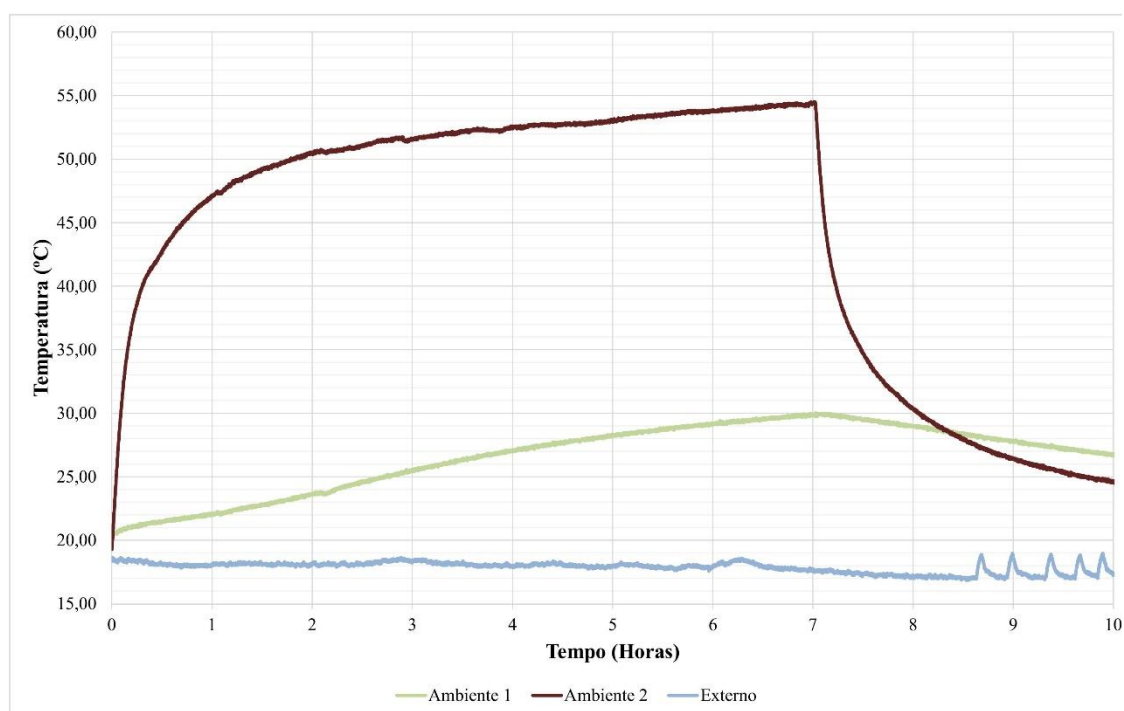
Quanto às temperaturas finais dos ensaios, observa-se uma convergência de valores, com resultados muito semelhantes entre os painéis BCS55, BCS45 e BCS35, em cada ambiente da câmara, o que indica condições de ensaio similares.

Os gráficos da Figura 40 auxiliam na análise do amortecimento e atraso térmico das misturas. E com base nesses gráficos foram obtidos os dados da Tabela 11. Nas temperaturas medidas durante os ensaios e apresentados nos gráficos anteriores, foi possível calcular a condutividade térmica das misturas BCS35, BCS45 e BCS55. Considerando que cada face do painel era composta por 3 termorresistências, foi necessário fazer o cálculo da média entre os resultados de temperaturas dos pontos P1A, P1B e P1C (localizados na face do painel voltado para o ambiente 1). Da mesma forma,

tem-se o cálculo da média entre os resultados de temperaturas dos pontos P2A, P2B e P2C (localizados na face do painel voltado para o ambiente 2). As curvas médias das temperaturas das faces 1 e 2, das misturas BCS35, BCS45 e BCS55 estão apresentadas na Figura 40.

Figura 38 - Comparação entre as temperaturas do Ambiente 1 e Ambiente 2 em BCS35, BCS45 e BCS55, respectivamente





Fonte: O autor

Quanto ao amortecimento térmico, é possível perceber que o painel BCS35 demonstrou um amortecimento térmico de 20,73°C. Esse valor sugere que o BCS35 é eficiente em atenuar as variações de temperatura, uma vez que o material de maior inércia térmica retarda a transferência de calor, tornando a resposta térmica mais lenta e controlada. O painel BCS45, por outro lado, mostrou um amortecimento térmico de 22,97°C, o que indica uma leve melhora na capacidade de suavizar as variações térmicas. Esse valor mais alto indica que o BCS45 é um pouco mais eficiente em amortecer as flutuações térmicas, tornando o ambiente mais estável ao longo do tempo.

O painel BCS55, com um amortecimento térmico de 22,99°C, apresentou valores próximos ao BCS45, o que também indica uma boa capacidade de controle térmico. Isso significa que, embora o BCS55 tenha um amortecimento térmico similar ao BCS45, sua resposta às variações térmicas é mais imediata, o que pode ser vantajoso em situações onde a velocidade de adaptação à temperatura ambiente seja um fator importante.

Em resumo, um maior amortecimento térmico indica que o sistema é mais eficaz em suavizar as flutuações de temperatura, proporcionando um ambiente mais estável. O BCS55, com o maior valor de amortecimento térmico, é o mais eficiente nesse aspecto, seguido pelo BCS45 e BCS35, que apresentam valores semelhantes.

Tabela 11 - Amortecimento e Atraso Térmico para BCS35, BCS45 E BCS55

Sensor	BCS35			BCS45			BCS55		
	Temp Máx. ¹ (°C)	Amort. Térm. ² (°C)	Atraso Térm. ³	Temp Máx. ¹ (°C)	Amort. Térm. ² (°C)	Atraso Térm. ³	Temp Máx. ¹ (°C)	Amort. Térm. ² (°C)	Atraso Térm. ³
Amb.1	30,84	20,73	2 horas	30,35	22,97	1 horas e 50 minutos	30,03	22,29	30 minutos
Amb.2	51,57			53,32			53,32		

Fonte: O autor

Obs: ¹-Temp. Máx. = temperatura máxima

²-Amort. Térm.= amortecimento térmico

³-Atraso. Térm. = atraso térmico

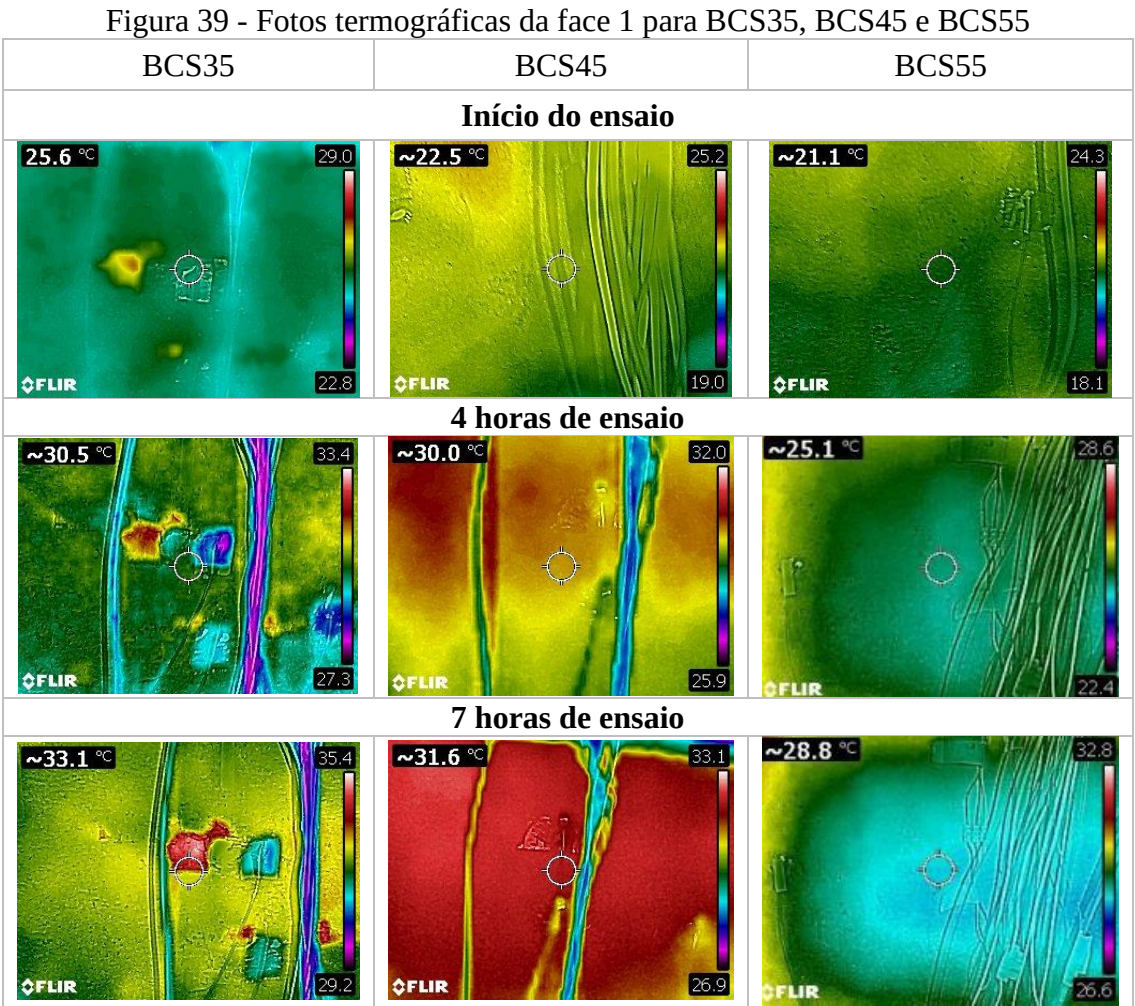
O atraso térmico foi claramente observado nos painéis BCS35, BCS45, e BCS55, com cada um exibindo comportamentos distintos. O painel BCS35, por exemplo, apresenta um atraso térmico de 2 horas, o que significa que ele demora mais tempo para refletir as mudanças de temperatura do ambiente em comparação aos outros sensores. Esse atraso ocorre porque o BCS35 tem uma maior resistência térmica, ou seja, ele retarda a transferência de calor entre os ambientes (A1 para A2, por exemplo), resultando em um aumento mais lento da temperatura.

Por outro lado, o painel BCS45 tem um atraso térmico de 1 hora e 50 minutos, enquanto o BCS35 apresenta um atraso muito próximo, com uma diferença de apenas 10 minutos, o que os torna praticamente equivalentes nesse aspecto. Já o painel BCS55 apresenta um atraso significativamente menor, de 30 minutos. Essa diferença sugere que o BCS55 tem uma capacidade mais rápida de responder às mudanças de temperatura externa, com menor tempo para transferência de calor. No entanto, é importante refletir sobre o impacto do atraso térmico: um menor atraso pode indicar maior rapidez na dissipação ou retenção de calor, mas um maior atraso térmico pode ser vantajoso em alguns casos, pois implica em um retardo maior na transferência de calor, contribuindo para estabilidade térmica em determinadas situações. Essa questão merece análise mais aprofundada dependendo do contexto de aplicação.

O atraso térmico está diretamente relacionado à inércia térmica dos materiais. Materiais com maior inércia térmica, como o painel BCS35, são capazes de retardar a variação da temperatura devido à sua capacidade de armazenar calor, levando a um atraso maior nas mudanças de temperatura. Em contrapartida, materiais com menor inércia térmica, como o BCS45 e o BCS55, respondem de maneira mais imediata, apresentando um atraso térmico menor.

Esses resultados indicam que a utilização de bioconcreto com maior quantidade de serragem, como o painel BCS55, pode ser mais eficaz para situações que exigem maior controle da temperatura interna, com maior resistência a variações térmicas e maior capacidade de armazenamento de calor, ou seja, com maior inércia térmica.

Conforme mencionado, durante os ensaios foram realizadas medições utilizando uma câmera termográfica. Os resultados dessa medição podem ser observados na Figura 39 e na Tabela 12. É importante destacar que a câmera termográfica exibe uma escala de temperatura em cada uma de suas imagens, porém essa escala é variável, cobrindo as temperaturas máximas e mínimas da região visível pela lente.



Fonte: O autor

A partir das imagens térmicas, é possível observar a distribuição de temperatura nas diferentes faces ao longo do tempo e entre os tipos de painéis BCS35, BCS45 e BCS55. A mistura BCS35 apresenta um comportamento consistente ao longo do tempo. Desde o

início até as 7 horas de observação, quase toda a superfície do painel exibe uma distribuição homogênea de temperatura, com exceção de pequenos pontos e uma área maior na região central superior que apresenta leve variação térmica em relação ao restante do painel.

Na mistura BCS45, há indícios de heterogeneidade no início, mas essa diferença se estabiliza gradualmente. Após 7 horas, o painel atinge uma condição praticamente homogênea, com temperaturas uniformes em quase todos os pontos.

Por sua vez, a mistura BCS55 demonstra uma homogeneidade térmica notável em quase toda a superfície do painel desde o início, exceto por uma borda lateral que apresenta variações, possivelmente relacionadas a problemas durante o processo de concretagem.

A partir da Tabela 12, é possível observar a comparação entre as temperaturas obtidas em diferentes momentos e modos de medição (ensaio e câmera termográfica) para os três painéis BCS35, BCS45 e BCS55. Os dados apresentados indicam as variações de temperatura central na face P1A dos painéis em três momentos: início, 4 horas e 7 horas de medição.

No início, os valores de temperatura obtidos por meio do ensaio são semelhantes aos resultados da câmera termográfica para os três painéis, com exceção BCS55 que possui temperaturas iguais entre ensaio e câmera termográfica, a diferença máxima observada foi de 0,7°C para BCS45. Nos 4 e 7 horas de medição, a diferença entre os valores obtidos pelos dois métodos começa a aumentar com 7 horas, para BCS55 observa-se uma diferença maior, de 1,8°C.

Por fim, a análise dos dados permite concluir que, no contexto apresentado, os resultados dos ensaios e as medições realizadas pela câmera termográfica têm uma boa correspondência, com pequenas diferenças que não comprometem a precisão dos resultados. Esse padrão de concordância reforça a eficácia da câmera termográfica como um método confiável para medir as temperaturas nas superfícies dos painéis ao longo do tempo.

Tabela 12 - Comparação da Temperatura central na face P1 para BCS35, BCS45 e BCS55 em duas diferentes medições

Comparação da Temperatura central na Face P1A de cada painel		Temperatura °C		
		BCS35	BCS45	BCS55
Início	Ensaio	25,42	21,77	21,10
	Câmera Termográfica	25,60	22,50	21,10
4 horas	Ensaio	29,93	29,87	23,68
	Câmera Termográfica	30,50	30,0	25,10
7 horas	Ensaio	32,65	30,27	27,02
	Câmera Termográfica	33,10	31,60	28,80

Fonte: O autor

4.2.3.2. Condutividade Térmica

Para calcular a condutividade térmica de cada painel, foram aplicadas as equações a seguir:

- Trocas Térmicas por condução (Lei de Fourier)

$$q1 = \frac{\lambda \cdot A \cdot \Delta\theta}{e}$$

- Trocas Térmicas na superfície externa do material

$$q2 = h_e \cdot A (\theta_2 - t_2)$$

Como $h_e = \frac{1}{R_{se}}$ (Frota; Schiffer, 2007), em que o valor de R_{se} para a direção do fluxo de calor horizontal é 0,04 (m².K)/W (ABNT, 2005), então o valor de h_e é 25 W/(m².K).

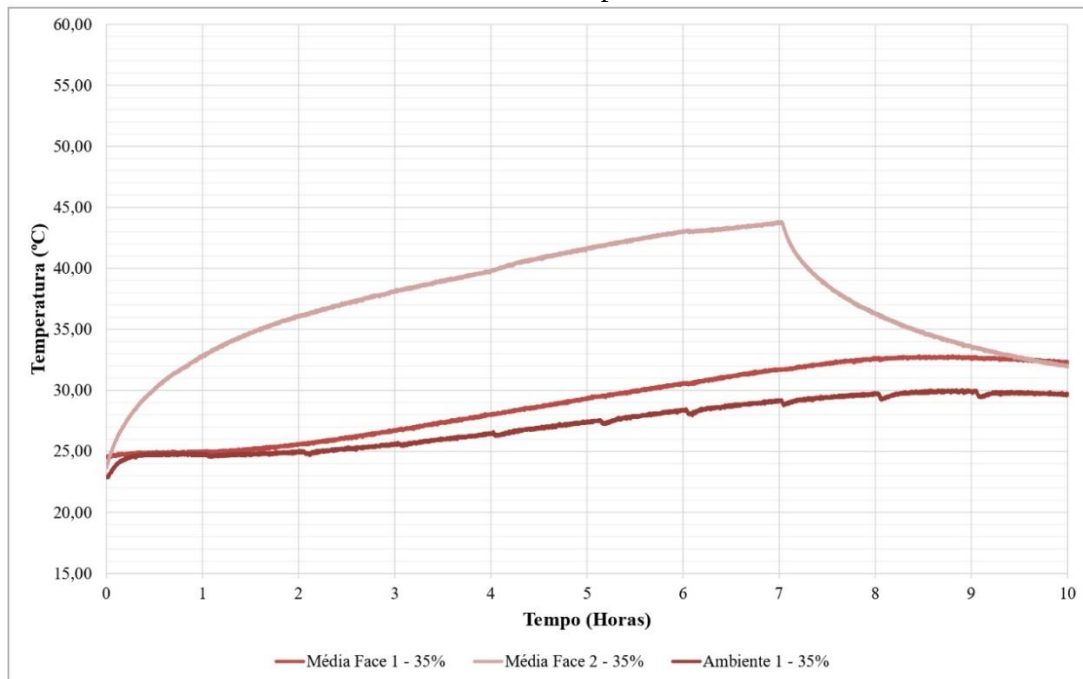
Onde:

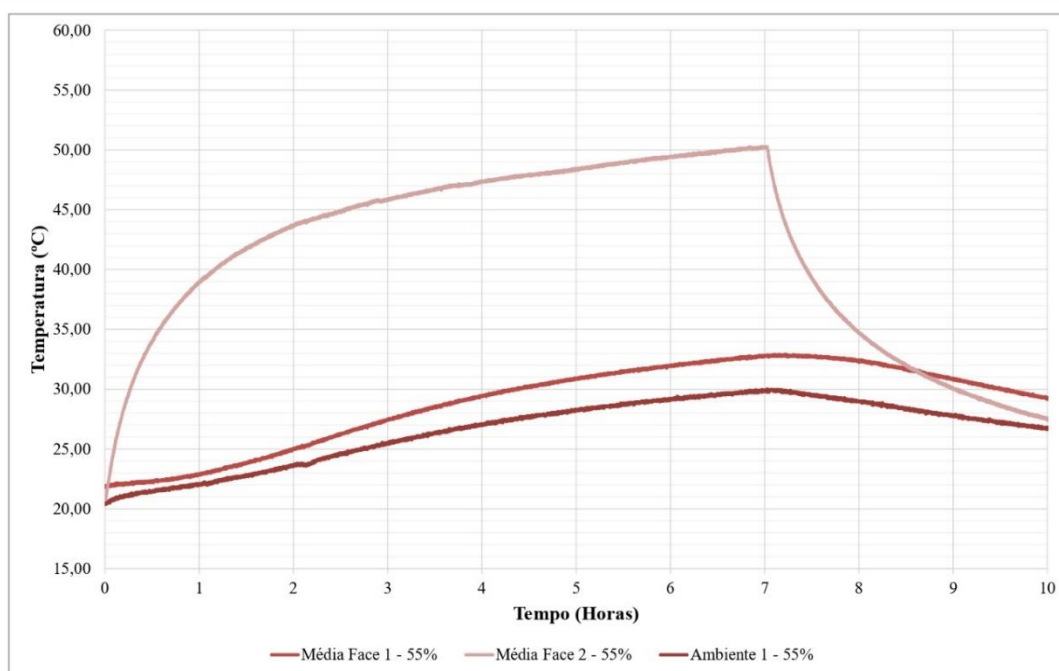
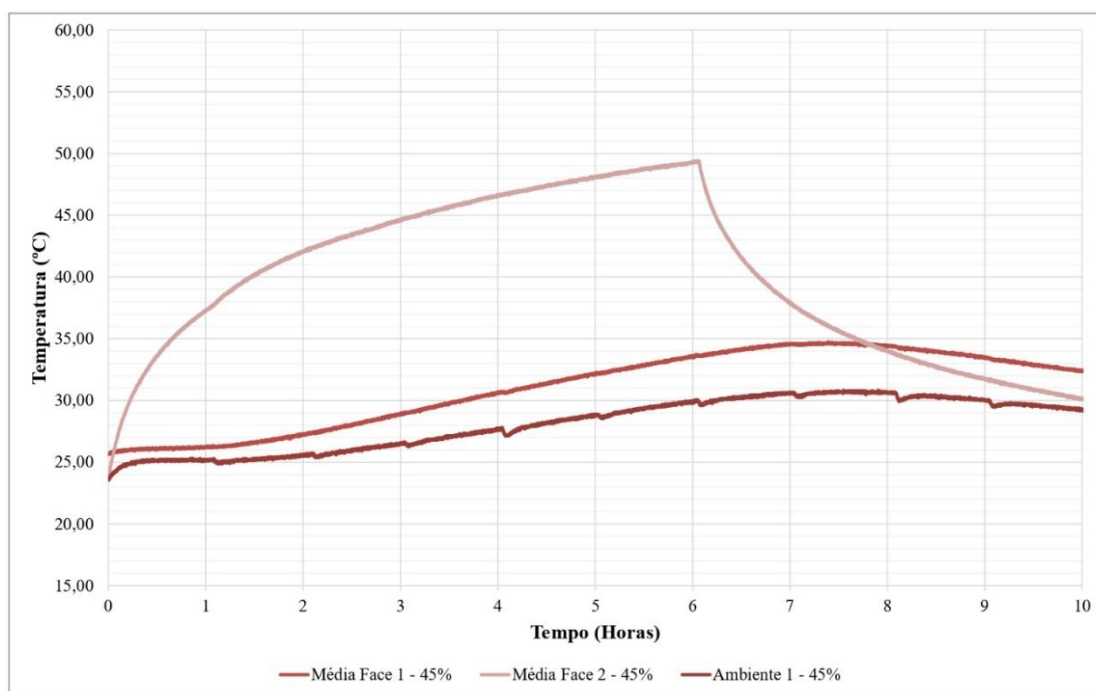
- $q1$ é o fluxo térmico por condução, em [W];
- $q2$ é o fluxo térmico na superfície externa (por convecção e radiação), em [W];
- λ é o coeficiente de condutividade térmica, em [W/(m.°C)];
- h_e é o coeficiente de condutância térmica superficial externa, em [W/(m².°C)];
- A é a área da parede normal à direção de transferência de calor, em [m²];
- e é a espessura da amostra, em [m];
- R_{se} é a resistência térmica superficial externa, em [(m².°C)/W].

- $\Delta\theta$ é a diferença de temperatura entre as superfícies da parede, em [°C].
- θ_2 é a temperatura da superfície voltada para A2, em [°C].
- t_2 é a temperatura do ar em A2, em [°C].

Com base nas temperaturas medidas durante os ensaios e apresentados nos gráficos anteriores, foi possível calcular a condutividade térmica das misturas BCS35, BCS45 e BCS55. Considerando que cada face do painel era composta por 3 termorresistências, foi necessário fazer o cálculo da média entre os resultados de temperaturas dos pontos P1A, P1B e P1C (localizados na face do painel voltado para o ambiente 1). Da mesma forma, tem-se o cálculo da média entre os resultados de temperaturas dos pontos P2A, P2B e P2C (localizados na face do painel voltado para o ambiente 2). As curvas médias das temperaturas das faces 1 e 2, das misturas BCS35, BCS45 e BCS55 estão apresentadas na Figura 40.

Figura 40 - Curva do ambiente 1 e curvas médias das faces 1 e 2 das misturas BCS35, BCS45 e BCS55, respectivamente





Fonte: O autor

O intervalo escolhido para análise foi entre 4 e 7 horas, período em que, segundo dado obtido pela literatura, podemos considerar uma estabilidade maior na taxa de elevação de temperatura no ambiente 2. A estabilidade das leituras durante esse período permite calcular com maior precisão a condutividade térmica dos painéis.

Sendo assim, a condutividade térmica de cada painel foi calculada adotando-se as equações anteriormente apresentadas, obtendo-se o resultado de 0,43(W/mK) para BCS35, 0,41(W/mK) para BCS45 e 0,38(W/mK) para BCS55. Esses valores foram

utilizados para fazer a retroalimentação da simulação, uma vez que inicialmente a mesma foi feita com valores calculados de acordo com a literatura.

4.3. Simulações termoenergéticas

4.3.1. Etapa 1

A Tabela 13 apresenta os dados de PHFT, T_{Omax} e C_{gTT} obtidos para cada zona térmica e para a UH do modelo de referência e dos modelos reais referentes às misturas analisadas.

Tabela 13 – Síntese dos resultados obtidos de PHFT, T_{Omax} e C_{gTT} para o modelo de referência e para os modelos com os painéis BCS35, BCS45 e BCS55

Modelo	APP	PHFT (%)	T _{Omax} (°C)	C _{gTT} (kWh/ano)	Desempenho
Referência	Z1	65,70	35,74	1368	-
	Z3	92,70	33,52	632	-
	Z4	95,60	34,23	525	-
	UH	84,70	35,74	2225	-
Real – BCS35	Z1	80,40	33,74	938	Intermediário/B
	Z3	96,50	32,58	492	
	Z4	98,00	32,58	439	Mínimo/C
	UH	91,60	33,74	1869	
Real – BCS45	Z1	80,40	33,68	937	Intermediário/B
	Z3	96,60	32,03	489	
	Z4	97,90	32,53	433	Mínimo/C
	UH	91,60	33,68	1715	
Real – BCS55	Z1	80,30	33,63	940	Intermediário/B
	Z3	96,60	31,98	488	
	Z4	97,70	32,49	425	Mínimo/C
	UH	91,60	33,62	1658	

Fonte: O autor

A Z1 (sala e cozinha) apresenta os melhores resultados para temperatura operativa máxima (T_{OMAX}), o que pode ser atribuído à sua maior exposição à ventilação natural e ao seu posicionamento em relação à disposição e implantação do objeto de estudo escolhido. Esse APP foi observada como a melhor em termos de temperatura máxima.

A Z3 (quarto 02), que tem um resultado positivo a respeito do percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa (PHFT), se destaca. Isso ocorre porque

ela está posicionada de maneira estratégica, protegida da insolação direta pela localização dos restantes dos ambientes, o que ajuda a garantir um espaço mais confortável.

Em termos de desempenho geral, as zonas Z1 e Z3 apresentam desempenho intermediário, enquanto que a Z4 apresenta desempenho mínimo, o que reflete o cuidado na disposição da unidade habitacional e as medidas de sombreamento e ventilação, resultando em um desempenho mínimo pela NBR 15575, que é classificado como C pela INI-R. Isso é indicativo de que, embora algumas zonas apresentem melhores desempenhos, a unidade habitacional como um todo ainda não atinge a classificação mais alta em termos de conforto térmico.

Em relação à planta do objeto de estudo (ver Figura 26), a distribuição espacial contribui para essas observações, com zonas mais expostas ao sol (como a Z1) sendo mais propensas a acumular calor, enquanto zonas mais protegidas (como a Z3) têm temperaturas operativas mais confortáveis.

Ao comparar as zonas do modelo referência com os modelos reais (BCS35, BCS45 e BCS55), é possível observar algumas diferenças no desempenho térmico e no conforto dos ambientes de permanência prolongada (APPs), devido às propriedades térmicas das misturas.

A Z1, que corresponde à sala e à cozinha, no modelo referência, apresentou uma temperatura máxima de 35,74°C e uma carga térmica total (CgTT) de 1368 kWh/ano. Esse valor reflete a exposição da zona ao calor, embora ainda se mantenha dentro de parâmetros toleráveis. Nos modelos reais BCS35, BCS45 e BCS55, a Z1 teve um desempenho mais eficiente, com temperaturas máximas de 33,74°C, 33,68°C e 33,63°C, respectivamente e CgTT consideravelmente mais baixos, indicando que o desempenho térmico dos materiais escolhidos nos modelos reais, como os de melhor capacidade isolante, e a ventilação natural ajudaram a reduzir o acúmulo de calor.

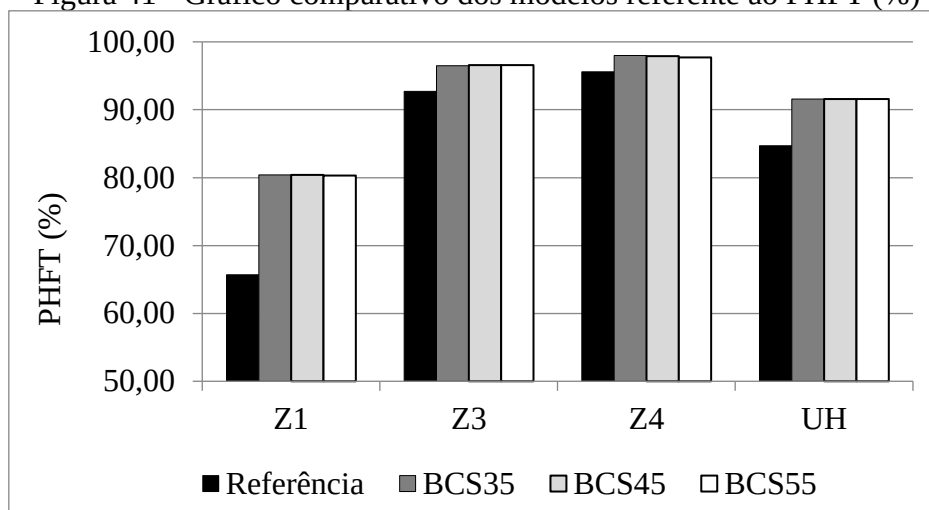
Já a Z3, apresentou no modelo referência uma temperatura máxima de 33,52°C e CgTT de 632 kWh/ano. Nos modelos reais, esse desempenho foi significativamente melhorado, com temperaturas máximas levemente mais baixas e cargas térmicas também menores. A melhoria observada nos modelos reais pode ser atribuída ao uso de materiais mais eficientes termicamente e ao melhor controle do ambiente através do sombreamento e ventilação adequados.

Na Z4, correspondente ao quarto 01, os resultados do modelo referência também apresentaram temperaturas com Tomax de 34,23°C e CgTT de 525 kWh/ano. Nos modelos reais, a temperatura máxima teve uma queda com Tomax de 32,58°C, 32,53°C e 32,49°C, para BCS35, BCS45 e BCS55, respectivamente. Além disso, a carga térmica foi reduzida, especialmente nos modelos BCS45 e BCS55. Isso indica que, apesar da exposição limitada ao calor, a eficiência térmica dos materiais e a ventilação natural contribuíram para uma melhoria no controle da carga térmica, mesmo que os resultados não tenham mostrado uma grande variação.

De forma geral, os modelos reais (BCS35, BCS45 e BCS55) mostraram um desempenho superior em relação ao modelo de referência, especialmente em termos de carga térmica total, temperatura máxima e percentual de horas de ocupação em uma faixa de temperatura operativa. Isso se deve ao uso de materiais com maior capacidade de isolamento térmico, como demonstrado na tabela de propriedades dos materiais. A Z1, que tem uma grande abertura para ventilação, foi a zona com os melhores resultados, evidenciando a importância de um bom projeto arquitetônico para o conforto térmico. Assim, os modelos reais conseguiram reduzir a carga térmica e melhorar as condições de conforto, enquanto o modelo referência apresentou resultados mais elevados, indicando uma performance menos eficiente em termos de controle térmico. Vale ressaltar que a simulação levou em consideração apenas os painéis de vedação, logo a cobertura possui grande influência para tais resultados, uma vez que a depender, uma cobertura bem projetada, com materiais eficientes e soluções arquitetônicas adequadas, pode reduzir significativamente a carga térmica total de uma edificação, promovendo um ambiente mais confortável e energeticamente eficiente. Isso é especialmente relevante em climas quentes, onde o controle da temperatura interna e o uso de soluções sustentáveis para reduzir o consumo de energia se tornam essenciais para o conforto e a eficiência da edificação.

A partir da Figura 41, é possível observar a comparação entre as zonas Z1, Z3, Z4 e a unidade habitacional (UH), levando em consideração o desempenho termoenergético, especificamente o parâmetro PHFT (Percentual de horas de ocupação em uma faixa de temperatura operativa) em cada um dos modelos.

Figura 41 - Gráfico comparativo dos modelos referente ao PHFT (%)



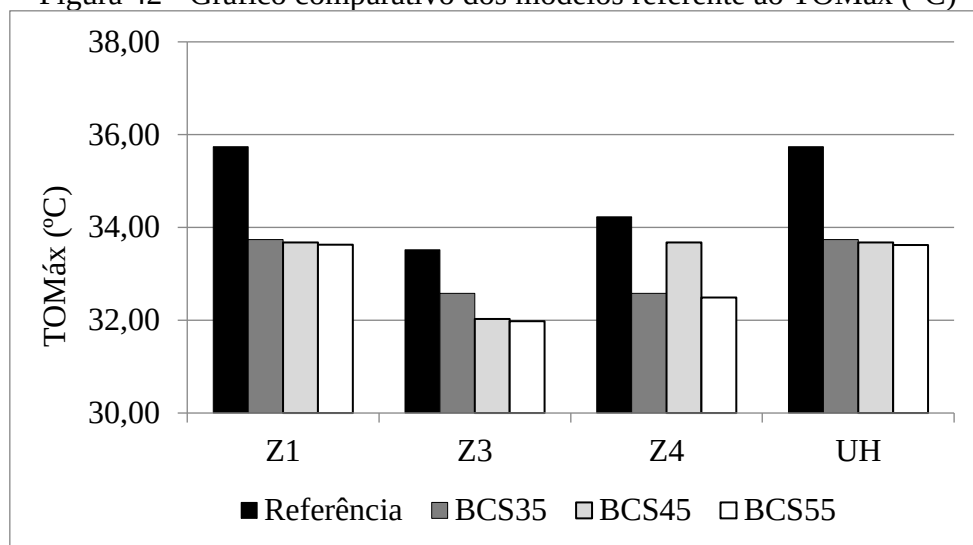
Fonte: O autor

De acordo com o gráfico, Na Zona 1 (sala), o modelo referência obteve um percentual próximo de 65%, enquanto os modelos BCS35, BCS45 e BCS55 apresentaram um aumento progressivo no PHFT. Essa diferença sugere que os modelos reais têm um desempenho superior em relação ao controle térmico proporcionado pela configuração original da unidade habitacional. Um padrão semelhante foi observado na Zona 3, onde a referência manteve um desempenho superior com valores acima de 90%. Os modelos de reais apresentaram um aumento de aproximadamente 6% em relação à referência.

A Zona 4 revela que os resultados para o PHFT dos modelos reais foram bem próximo, mas com uma melhoria quando comparada ao modelo referência. Essa melhoria pode ser atribuída a características específicas do modelo, como melhor sombreamento ou controle térmico, que favorecem o desempenho térmico dessa zona específica, resultando em um pequeno aumento de cerca de 3% em relação à referência. Por fim, ao observar o desempenho da unidade habitacional como um todo (UH), os modelos reais novamente apresentaram os melhores resultados.

A seguir na Figura 42, é possível observar a comparação entre as zonas Z1, Z3, Z4 e a unidade habitacional (UH), levando em consideração o desempenho termo-energético, especificamente o parâmetro TOMáx (Temperatura operativa anual máxima) em cada um dos modelos.

Figura 42 - Gráfico comparativo dos modelos referente ao TOMáx (°C)



Fonte: O autor

Para o modelo referência, a temperatura máxima registrada na Z1 foi de 35,74°C, a mais alta entre as zonas testadas. Comparando com as outras zonas, Z3, Z4 e UH (unidade habitacional), a diferença na temperatura máxima foi mais pronunciada na Z1, com uma variação de 3% a 5% em relação às demais zonas. A Z3 apresentou um valor de TOMáx de 33,52°C, indicando uma redução de aproximadamente 6% em comparação com Z1.

Quando observamos os modelos de reais BCS35, BCS45 e BCS55, verificamos algumas variações com redução de temperatura. O modelo BCS35, na Z1, apresentou uma redução de cerca de 5,6% na TOMáx, registrando 33,74°C, comparado ao valor de 35,74°C do modelo de referência. Esse comportamento se manteve em outras zonas também. Em Z3, a redução foi de 2,8%, e em Z4 a diminuição foi de 4,8%. No entanto, o modelo BCS55 causou alterações expressivas, com variações de 4,3% dependendo da zona. Na unidade habitacional (UH), o modelo BCS55 se destacou, com uma diminuição de 5,9% em relação à referência.

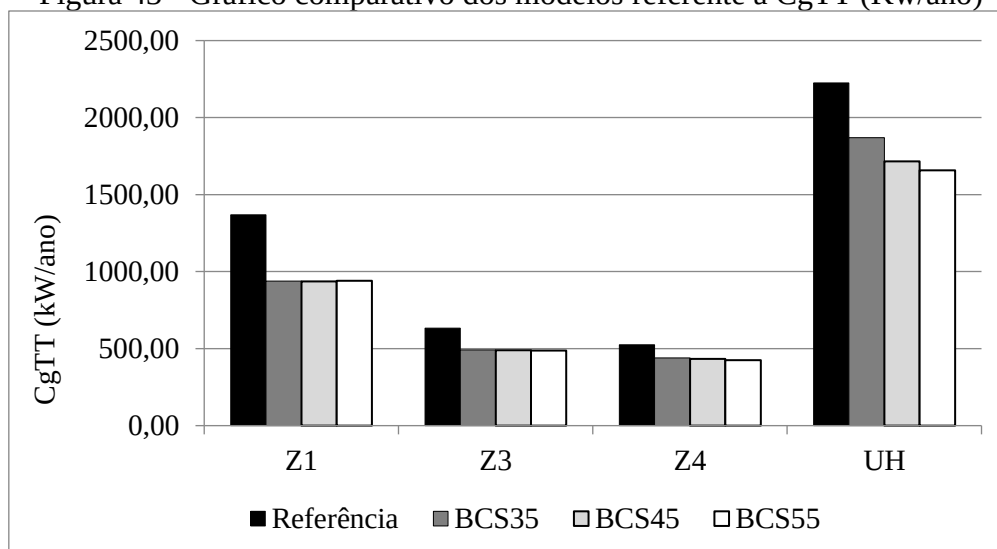
Em relação ao modelo BCS45, observamos que ele apresentou uma melhoria de cerca de 3% a 5% em todas as zonas, especialmente em Z1 e Z3, com redução de aproximadamente 2°C nas temperaturas máximas, quando comparado com o modelo original de referência. A diferença foi mais acentuada na Z1 e na UH, como já mencionado, e menos expressiva na Z4.

O modelo BCS55, que foi o que apresentou as maiores reduções de temperatura, parece oferecer uma melhor dissipação de calor em comparação com o modelo de referência,

possivelmente devido à sua capacidade de isolamento térmico. Assim, podemos concluir que a escolha do material do sistema construtivo possui benefícios na temperatura máxima dentro das zonas da edificação.

Por fim, no que diz respeito a CgTT (Carga térmica total), nota-se de acordo com a Figura 43, que em relação a Z1 o modelo referência apresentou um valor de 1368 kWh/ano, enquanto o modelo BCS35 teve uma carga térmica de 938 kWh/ano, representando uma redução de 31,5%. O modelo BCS45 apresentou uma leve queda para 937 kWh/ano (redução de 31,6%), e o BCS55 teve 940 kWh/ano, resultando em uma redução de 31,5%. Esses resultados indicam uma performance energética mais eficiente dos modelos reais em comparação ao modelo referência.

Figura 43 - Gráfico comparativo dos modelos referente a CgTT (Kw/ano)



Fonte: O autor

Na Z3, o modelo referência teve uma carga térmica de 632 kWh/ano, e os modelos reais apresentaram reduções de carga térmica: 492 kWh/ano para o BCS35, 489 kWh/ano para o BCS45 e 488 kWh/ano para o BCS55, representando uma taxa de aproximadamente 22,2% a 22,7%. Novamente, os modelos reais demonstram um desempenho superior ao modelo referência, com uma carga térmica mais baixa, o que significa uma maior eficiência no consumo de energia.

Enquanto isso, na Z4, o modelo referência obteve um valor de 525 kWh/ano, enquanto os modelos reais tiveram os seguintes resultados: 439 kWh/ano para o BCS35, 433 kWh/ano para o BCS45 e 425 kWh/ano para o BCS55. As reduções variaram de 16,3%

a 19,0%, novamente demonstrando uma melhoria na eficiência energética em relação ao modelo referência.

Por fim, na Unidade Habitacional (UH), o modelo referência obteve a maior carga térmica, com 2225 kWh/ano. Os modelos reais novamente apresentaram resultados consideravelmente inferiores, com 1869 kWh/ano para o BCS35, 1715 kWh/ano para o BCS45 e 1658 kWh/ano para o BCS55, o que resultou em uma redução de 16,0% a 25,5% em comparação ao modelo referência. A maior redução foi observada no modelo BCS55, que teve uma redução de 25,5%, destacando-se como o mais eficiente.

Em resumo, os modelos reais demonstraram uma redução constante na carga térmica total em todas as zonas analisadas, com destaque para o BCS55, que obteve as maiores reduções, especialmente na Zona UH. Isso indica que os modelos reais proporcionaram um desempenho superior ao modelo referência, com uma maior eficiência energética, o que pode resultar em menor consumo de energia e maior sustentabilidade a longo prazo.

Em resumo, os modelos reais BCS35, BCS45 e BCS55, comparados ao modelo de referência, apresentam desempenho termo-energético consistente em relação à faixa de eficiência. Para as zonas Z1 e Z3, todos os modelos reais alcançam a classificação "Intermediário/B", demonstrando um desempenho acima do mínimo exigido, mas ainda abaixo do ideal. Em contrapartida, as zonas Z4 e UH permanecem na classificação "Mínimo/C", indicando que cumprem os requisitos básicos, mas com desempenho limitado. Esses resultados sugerem que, embora os modelos reais atendam aos padrões mínimos em algumas áreas, há uma oportunidade clara de melhoria, especialmente para as zonas com classificação mais baixa, visando otimizar a eficiência termoenergética como um todo, como por exemplo uma cobertura com melhor eficiência termoenergética, já que a mesma possui grande influência como parâmetro na simulação.

4.3.2. Etapa 2

Os resultados apresentados Tabela 14 a seguir, foram obtidos através das propriedades térmicas calculadas a partir da etapa experimental através do ensaio na câmara térmica. Para fins de comparação, a Tabela 15 apresenta os resultados obtidos a partir da literatura.

Tabela 14 – Propriedades termofísicas calculadas a partir dos resultados obtidos e utilizadas nas novas simulações

Elementos	Espessura Equivalente (m)	Condutividade (W/mK)	Densidade Equivalente (Kg/m³)	Calor Específico (J/KgK)	Transmitância (U) [W/(m²·K)]	Capacidade térmica (C) [kJ/(m²·°C)]
BCS35	0,10	0,4313	1825,03	1455	2,29	265,50
BCS45	0,10	0,4127	1617,61	1585	2,43	256,40
BCS55	0,10	0,3834	1410,19	1715	2,32	241,80

Fonte: O autor

Tabela 15 – Propriedades termofísicas calculadas a partir dos resultados obtidos e utilizadas nas novas simulações

Elementos	Espessura Equivalente (m)	Condutividade (W/mK)	Densidade Equivalente (Kg/m³)	Calor Específico (J/KgK)	Transmitância (U) [W/(m²·K)]	Capacidade térmica (C) [kJ/(m²·°C)]
BCS35	0,10	0,7747	1452,50	1455	3,34	211,30
BCS45	0,10	0,6646	1267,50	1585	3,12	200,90
BCS55	0,10	0,5545	1082,50	1715	2,85	185,60

Fonte: Calculados de acordo com a NBR 15220 (ABNT, 2022), Anexo V do RAC (BRASIL, 2013) e Ordenes *et al.*, (2003)

A Tabela 16 apresenta os dados de PHFT, Tomax e CgTT obtidos para cada zona térmica e para a UH do modelo de referência e dos modelos reais referentes às misturas analisadas.

Tabela 16 – Resultados do modelo referência comparado ao real com os painéis BCS35, BCS45 e BCS55

Modelo	APP	PHFT (%)	Tomax (°C)	CgTT (kWh/ano)	Desempenho
Referência	Z1	65,70	35,74	1368	-
	Z3	92,70	33,52	632	-
	Z4	95,60	34,23	525	-
	UH	84,70	35,74	2225	-
Real – BCS35	Z1	85,50	33,13	788	Intermediário/B
	Z3	97,50	31,71	482	
	Z4	99,00	32,16	480	Mínimo/C
	UH	94,00	33,13	1791	Intermediário/B
Real – BCS45	Z1	85,90	33,12	753	Superior/A
	Z3	97,40	31,70	415	Intermediário/B
	Z4	98,60	31,85	477	Mínimo/C
	UH	93,80	33,12	1650	Intermediário/B
Real – BCS55	Z1	86,30	32,50	675	Superior/A
	Z3	98,30	31,68	405	Intermediário/B
	Z4	99,50	30,15	474	Mínimo/C
	UH	94,70	32,50	1645	Intermediário/B

Fonte: O autor

Na Zona Z1, o modelo referência registrou um PHFT de 65,70%, enquanto que para os modelos reais, houve um aumento considerável, alcançando 85,50% com o BCS35 (aumento de 19,8%), 85,90% com o BCS45 (aumento de 20,2%) e 86,30% com o BCS55 (crescimento total de 20,4%). Esses resultados indicam que os painéis, especialmente o BCS55, proporcionaram uma melhoria significativa, em termos de isolamento térmico.

Na Zona Z3, o modelo referência apresenta um desempenho elevado, com um PHFT de 92,70%. No entanto os modelos reais apresentaram melhorias mais sutis, mas ainda relevantes. O BCS35 demonstra um resultado de 97,50% (crescimento de 5,2%), o BCS45 alcançou 97,40% (aumento de 5,1%) e o BCS55 chegou a 98,30% (crescimento total de 6,0%). Esses resultados mostram que, apesar de um desempenho inicial alto, os painéis foram capazes de otimizar ainda mais a eficiência na Zona Z3.

Por fim, na Zona Z4, o modelo referência apresentou um PHFT de 95,60%. Com os modelos reais, os resultados atingiram a 99,00% com o BCS35 (crescimento de 3,6%), 98,60% com o BCS45 (aumento de 3,1%) e 99,50% com o BCS55 (crescimento total de 4,1%). Aqui, o desempenho do BCS55 foi o mais notável.

Em relação a ToMáx, na Zona Z1, o modelo referência indica um ToMáx de 35,74°C. Para os modelos reais, houve uma redução expressiva nos valores: com o BCS35, a temperatura foi reduzida para 33,74°C, representando uma queda de 5,6%. Já com o BCS45, a temperatura foi reduzida para 33,68°C, marcando uma queda de 5,7%, e com o BCS55, a temperatura foi reduzida para 33,63°C, com uma queda de 5,9% em relação ao modelo de referência. Esses resultados mostram que os painéis, especialmente o BCS55, foram eficazes na mitigação do ganho térmico, contribuindo para um maior conforto ambiental.

Na Zona Z3, o modelo referência apresenta um ToMáx de 33,52°C. Para os modelos reais, a temperatura foi reduzida para 32,58°C no BCS35, indicando uma queda de 2,8%. Com o BCS45, a temperatura foi reduzida para 32,03°C, representando uma queda de 4,5%, e com o BCS55, houve uma redução na temperatura para 31,98°C, mostrando uma queda de 4,6%. Apesar de a Zona Z3 já apresentar valores relativamente baixos de ToMáx no modelo de referência, as misturas contribuíram para um ajuste que potencializa a eficiência térmica.

Na Zona Z4, o modelo de referência demonstra um ToMáx de 34,23°C. Para os modelos reais, assim como anteriormente houveram reduções na temperatura. Para o BCS35, a temperatura foi reduzida para 32,58°C (queda de 4,8%), enquanto que para o BCS45,

houve uma redução na temperatura para 32,53°C (queda de 4,9%) e com o BCS55, a temperatura chegou a 32,49°C, marcando uma queda de 5,1%. Esses dados destacam a eficácia da mistura BCS55 na mitigação do ganho térmico na Zona Z4, tornando-a a zona com maior redução percentual de temperatura.

Os resultados do CgTT (Carga térmica total em kWh/ano) mostram diferenças entre as zonas (Z1, Z3 e Z4) ao se comparar o modelo referência com os modelos reais BCS35, BCS45 e BCS55.

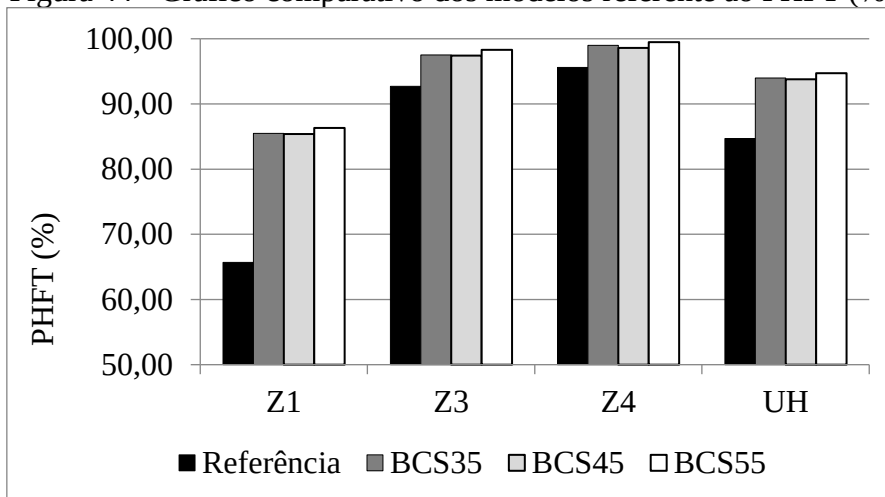
Na Zona Z1, o modelo de referência apresentou um consumo de 1368 kWh/ano. Com as misturas, houve uma redução significativa. Com o BCS35, o consumo foi reduzido para 788 kWh/ano, o que representa uma queda de 42,3%. Já para o BCS45, essa redução foi ainda maior, com um resultado de 753 kWh/ano, correspondendo a uma queda de 44,9%. Com o BCS55, a carga térmica total foi de 675 kWh/ano, correspondente a uma queda de 50,65%, a maior delas em comparação as misturas. Esses dados indicam que a mistura BCS55 oferece o maior impacto em termos de eficiência energética, reduzindo substancialmente o consumo total da Zona Z1, e resultando em uma eficiência “Intermediário/B” para o BCS35 e BCS45 e ‘Superior/A’ para o BCS55.

Na Zona Z3, o modelo referência apresentou um consumo de 632 kWh/ano. Com as misturas, houve uma redução significativa. Com o BCS35, o consumo foi reduzido para 482 kWh/ano, o que representa uma queda de 23,7%. Já para o BCS45, essa redução foi ainda maior, com um resultado de 415 kWh/ano, correspondendo a uma queda de 34,3%. Com o BCS55, a carga térmica total foi de 405 kWh/ano, correspondente a uma queda de 35,9%. Apesar de o modelo de referência já apresentar um consumo relativamente baixo na Zona Z3, os painéis, especialmente o BCS55, foram eficazes em melhorar ainda mais a eficiência energética. Vale ressaltar que para todas as misturas a eficiência resultou em “Intermediário/B”.

Na Zona Z4, o modelo de referência apresentou um consumo de 525 kWh/ano. Para os modelos reais, observou-se uma redução no consumo. O BCS35 resultou em um consumo de 480 kWh/ano, representando uma queda de 8,6%. O BCS45 apresentou um consumo de 477 kWh/ano, o que corresponde a uma queda de 9,1%. Por fim, com o BCS55, o consumo foi de 474 kWh/ano, marcando uma queda total de 9,7%. Embora as reduções na Zona Z4 tenham sido menos expressivas em comparação com outras zonas, elas ainda são significativas, evidenciando o impacto positivo dos painéis na eficiência energética. Vale ressaltar que para todas as misturas a eficiência resultou em “Mínimo/C”.

A partir da Figura 44, é possível observar a comparação entre os modelos reais BCS35, BCS45, BCS55 e a referência em relação ao parâmetro PHFT (Percentual de Horas de Ocupação em uma Faixa de Temperatura Operativa) nas zonas Z1, Z3, Z4 e na unidade habitacional (UH).

Figura 44 - Gráfico comparativo dos modelos referente ao PHFT (%)



Fonte: O autor

Na Z1, o modelo referência apresenta um PHFT de aproximadamente 65%. Este valor é relativamente baixo, sugerindo que, sem modificações, o ambiente não se mantém em uma faixa de temperatura ideal por uma grande parte do tempo. Quando os modelos BCS35, BCS45 e BCS55 são considerados, observa-se uma melhoria progressiva. O modelo BCS35 apresenta um aumento no PHFT, mas o modelo real que se destaca é o BCS55, que apresenta uma melhoria substancial de cerca de 23,08% em relação à referência, alcançando quase 90%. Isso sugere que o modelo BCS55, com suas características adicionais de controle térmico, como maior eficiência no isolamento térmico, consegue proporcionar um conforto térmico muito superior ao modelo referência. Essa diferença de desempenho é significativa e implica que, em um contexto de projeto, a adoção de materiais mais isolantes, como a mistura BCS55, poderia resultar em um ambiente consideravelmente mais confortável em termos térmicos, com menos variações de temperatura ao longo do dia.

Na Z3, a situação se apresenta de forma um pouco diferente. O modelo de referência já mostra um desempenho bastante eficiente, com um PHFT superior a 90%. Isso sugere que essa zona já possui características favoráveis ao controle térmico, como boa exposição solar ou ventilação natural. Mesmo assim, os modelos BCS35, BCS45 e

BCS55 ainda apresentam um aumento no PHFT, variando entre 5% e 6% acima da referência. Esse aumento relativamente pequeno pode ser devido ao fato de que a zona já é naturalmente eficiente em termos térmicos, e as melhorias adicionais são mais sutis. No entanto, a diferença ainda é importante, pois sugere que, mesmo em zonas já eficientes, a aplicação de materiais mais isolantes pode otimizar o desempenho térmico de maneira contínua.

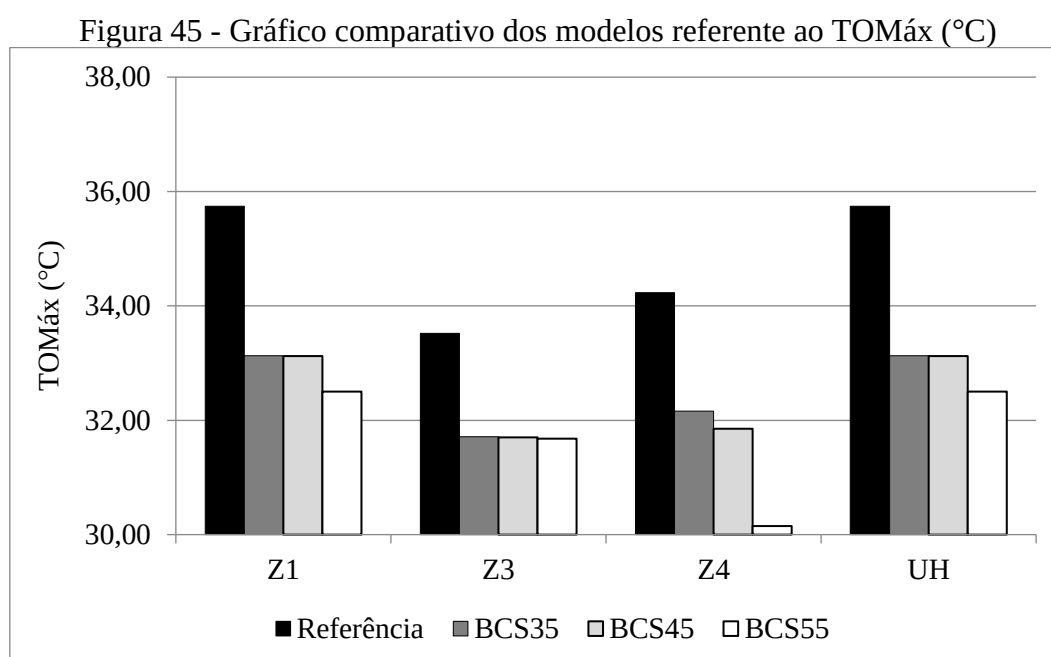
Na Z4, a análise revela um comportamento diferente. Embora o modelo de referência ainda tenha um PHFT que supera 85%, o modelo BCS35 apresenta uma leve melhora quando comparado ao BCS45, alcançando um PHFT ligeiramente superior. O aumento de cerca de 3% pode ser considerado pequeno, mas é relevante, pois indica que o modelo BCS45 tem características que favorecem a Z4, como um controle mais eficiente da insolação ou do sombreamento. Isso sugere que, em zonas mais específicas ou com características ambientais diferenciadas, os modelos de controle térmico podem ter um impacto significativo, mesmo que o aumento no PHFT seja relativamente modesto. No entanto, observa-se que o modelo BCS55 apresenta um desempenho superior ao BCS35, porém o PHFT está diretamente ligado ao desempenho mínimo, sendo assim esse aumento não possui tantos resultados significativos.

Por fim, ao analisar o desempenho da Unidade Habitacional, a tendência observada nas zonas individuais se mantém. Os modelos BCS35, BCS45 e BCS55 apresentam melhorias no PHFT de cerca de 5% em relação ao modelo de referência. Essa melhora sugere que, ao considerar a unidade habitacional de forma integrada, os modelos reais contribuem de maneira significativa para a otimização do desempenho térmico, promovendo uma maior eficiência e conforto térmico. Embora o aumento de 5% não seja tão expressivo quanto o observado na Zona 1, onde o modelo BCS55 apresentou um aumento de 23%, ele ainda indica que, mesmo em uma avaliação mais global, estes são mais eficazes na manutenção de um ambiente confortável em termos de temperatura.

Em suma, a análise global dos dados indica que os modelos reais BCS35, BCS45 e BCS55 têm um desempenho superior ao modelo de referência em todas as zonas analisadas, sendo especialmente eficazes em zonas como a Zona 1, onde o controle térmico é mais crítico. O modelo BCS55 se destaca como o mais eficiente, especialmente na Zona 1, com um aumento significativo no PHFT. Já os modelos BCS45 e BCS35 proporcionam melhorias mais modestas, mas ainda assim são mais eficientes que o modelo de referência. Esses resultados reforçam a ideia de que a implementação de materiais mais

isolantes pode melhorar consideravelmente o conforto térmico em ambientes residenciais, com benefícios que variam de acordo com as características específicas de cada zona e as necessidades térmicas do espaço.

A Figura 45 apresenta a comparação entre os diferentes modelos em relação ao parâmetro TOMáx (Temperatura Operativa Anual Máxima) nas zonas Z1, Z3, Z4 e na Unidade Habitacional (UH). A análise desses dados permite observar as variações das temperaturas máximas registradas entre o modelo referência e os modelos reais BCS35, BCS45 e BCS55.



Fonte: O autor

No modelo referência, a Z1 apresenta a temperatura máxima mais alta, com 35,7°C. Este valor é consideravelmente superior às outras zonas, como Z3, Z4 e UH. A Z3, por exemplo, tem uma temperatura máxima de cerca de 33,5°C, representando uma redução de aproximadamente 7% em relação à Z1. Já a Z4 e a UH apresentam temperaturas máximas de cerca de 33°C e 34°C, respectivamente, o que indica uma redução de 8% a 6% em relação à Z1. A diferença entre as zonas Z1 e UH, portanto, é de 2°C a 3°C, com a UH sendo a zona com a temperatura mais próxima do modelo de referência.

Ao analisar o modelo BCS35, observa-se que ele proporciona uma redução nas temperaturas máximas, mas de forma mais moderada em comparação com o modelo de referência. Na Z1, a TOMáx diminui para 33,7°C, o que representa uma queda de cerca de 6,6% em relação ao modelo referência. Essa redução também é notada nas outras

zonas: na Z3, a TOMáx diminui 2,8%, passando de 33,5°C para 32,5°C; em Z4, a queda é de 4,8%, com a temperatura reduzida de 33°C para 31,5°C; e na UH, a redução é de 2,9%, indo de 34°C para 33°C. Essas diminuições mostram que o modelo BCS35 tem um impacto positivo no desempenho térmico, oferecendo uma redução média de cerca de 5% nas temperaturas máximas em comparação com o modelo referência. Esse modelo oferece um controle térmico razoável, especialmente em zonas mais expostas, como a Z1, embora ainda apresente temperaturas mais elevadas nas zonas menos expostas, como a UH.

O modelo BCS45, por sua vez, apresenta uma melhora no desempenho térmico em relação ao BCS35. Na Z1, a TOMáx diminui para 34,5°C, representando uma redução de cerca de 4,2%. Nas zonas Z3 e Z4, as reduções são de aproximadamente 3%, com Z3 indo de 33,5°C para 32,5°C e Z4 de 33°C para 32°C. Na UH, a temperatura máxima cai para 32,5°C, o que representa uma redução de 4,2% em relação ao modelo de referência. Esse modelo mostra uma melhoria de 4% a 6% nas temperaturas máximas, especialmente em zonas mais expostas ao calor, como Z1 e UH. Embora as reduções não sejam tão acentuadas quanto as observadas no BCS55, o BCS45 proporciona um bom equilíbrio entre desempenho térmico e conforto.

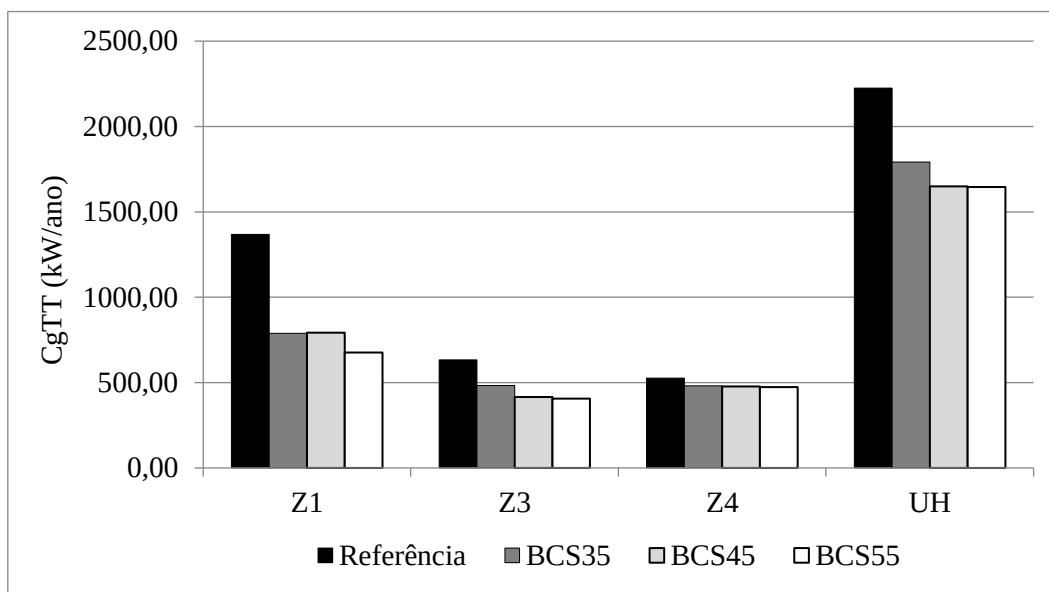
Por fim, o modelo BCS55 se destaca como o mais eficiente em termos de redução de temperatura. Na Z1, a TOMáx é reduzida em 13,9%, de 36°C para 31°C, a maior redução observada entre os modelos. Em Z3, a redução é de 11,8%, passando de 33,5°C para 29,5°C; em Z4, a diminuição é de 9,1%, de 33°C para 30°C; e na UH, a temperatura máxima é reduzida em 8,8%, de 34°C para 31°C. Esses resultados indicam que o modelo BCS55 oferece uma redução média de 10% a 13% nas temperaturas máximas, o que o torna o mais eficaz para controle térmico. Logo, conclui-se que esse modelo é o que apresenta resultados mais benéficos, uma vez que apresenta desempenho térmico superior, proporcionando um isolamento térmico considerável e melhor dissipação de calor nas zonas da edificação.

Ao analisar esses dados, podemos concluir que os modelos BCS35, BCS45 e BCS55 demonstram uma clara tendência de melhoria no controle térmico, com a redução das temperaturas máximas à medida que a capacidade de isolamento aumenta. O modelo BCS55, com as maiores reduções de temperatura, é o mais eficaz, proporcionando condições de conforto térmico superiores. O BCS45 oferece uma solução intermediária, enquanto o BCS35, embora eficiente, ainda apresenta temperaturas mais altas nas zonas

de maior exposição. Assim, a escolha do sistema construtivo tem um impacto significativo no conforto térmico e na eficiência energética da edificação.

A Figura 46 é referente à comparação dos modelos no que diz respeito à CgTT (Carga Térmica Total - kWh/ano). Observa-se que os resultados apresentam uma variação significativa entre os diferentes modelos em cada zona, demonstrando diferenças no desempenho energético e eficiência térmica.

Figura 46 - Gráfico comparativo dos modelos referente a CgTT (Kw/ano)



Fonte: O autor

Na Z1, o modelo referência obteve um valor de CgTT de aproximadamente 1350 kWh/ano, enquanto os modelos BCS35, BCS45 e BCS55 apresentaram valores consideravelmente mais baixos. O modelo BCS35 teve uma carga térmica de 550 kWh/ano, representando uma redução de 25,9% em relação ao modelo referência. Já o modelo BCS45 obteve uma carga térmica de 950 kWh/ano, com uma redução de 29,6%, e o BCS55 apresentou o melhor desempenho com 915 kWh/ano, resultando em uma redução de 32,2%. Essa queda nos valores de carga térmica indica uma melhoria substancial na eficiência energética dos modelos BCS em comparação ao modelo referência, destacando-se o BCS55 como o mais eficiente nesse aspecto.

Na zona Z3, a carga térmica do modelo referência foi de aproximadamente 650 kWh/ano, enquanto os modelos reais apresentaram reduções consideráveis. O BCS35 teve 560 kWh/ano, representando uma redução de 13,8%. O modelo BCS45 obteve 540 kWh/ano, resultando em uma redução de 16,9%, e o BCS55, novamente com o melhor desempenho,

registrou 510 kWh/ano, o que corresponde a uma redução de 21,5% em relação ao modelo referência. Esses dados mostram que, mesmo na zona Z3, os modelos BCS conseguem reduzir significativamente a carga térmica total, melhorando o desempenho energético.

Na zona Z4, o modelo referência obteve uma carga térmica de cerca de 580 kWh/ano. A redução nos modelos reais foi também notável: o BCS35 obteve 482 kWh/ano, representando uma queda de 16,9%. O modelo BCS45 teve 415 kWh/ano, o que representa uma redução de 28,5%, e o BCS55 novamente teve o melhor desempenho com 405 kWh/ano, correspondendo a uma redução de 30,1%. Estes valores indicam uma melhoria consistente na eficiência térmica, com destaque para a performance superior do BCS55.

Por fim, na zona da Unidade Habitacional (UH), o modelo referência teve uma carga térmica de aproximadamente 2100 kWh/ano. Os modelos BCS35, BCS45 e BCS55 apresentaram os seguintes resultados: o BCS35 com 1700 kWh/ano, o BCS45 com 1600 kWh/ano e o BCS55 com 1500 kWh/ano. As reduções foram significativas, variando de 14,3% no BCS35 até 28,6% no BCS55, destacando-se o BCS55 como o modelo mais eficiente, com a maior redução na carga térmica. Esse padrão de desempenho reforça a tendência de que os painéis BCS55 são os mais eficientes em termos de carga térmica total.

Em resumo, os modelos BCS35, BCS45 e BCS55 apresentaram melhorias consistentes na carga térmica total, com reduções notáveis em todas as zonas analisadas. O modelo BCS55 foi o que apresentou as maiores reduções, especialmente na Unidade Habitacional, indicando que ele proporciona uma performance energética superior, com menor consumo de energia. Isso sugere que os modelos reais, em comparação ao modelo referência não apenas oferecem maior eficiência, mas também podem contribuir para uma redução do impacto ambiental e maior sustentabilidade a longo prazo.

Os modelos reais (BCS35, BCS45, BCS55) variam de forma significativa, com a maioria apresentando desempenhos de “Intermediário/B” ou até mesmo “Mínimo/C” nas zonas Z4 e UH. Para as zonas Z1 e Z3, os modelos reais se mantêm dentro de uma faixa mais eficiente, atingindo a classificação "Intermediário/B", mas ainda abaixo da classificação ideal "Superior/A". No entanto, nota-se que o modelo BCS45, na Z1, obteve a classificação "Superior/A". Esse desempenho indica que ele é altamente eficiente comparado ao modelo referência, que obteve um desempenho inferior. O modelo BCS45 teve um consumo anual de energia de 792 kWh, mais baixo do que o modelo de referência

(788 kWh), mas com uma melhoria notável na temperatura máxima, o que é uma indicação de maior eficiência no controle de temperatura. Além disso, na zona UH, o modelo BCS55 obteve a mesma classificação "Intermediário/B" que os outros modelos.

Embora esses modelos atendam aos requisitos básicos de eficiência energética e desempenho térmico, ainda existe uma margem substancial para melhorias, especialmente nas zonas com classificações mais baixas. O fato de o consumo de energia de alguns modelos reais estar consideravelmente acima do modelo de referência indica uma necessidade de ajustes, principalmente na cobertura e na otimização dos sistemas de energia, para garantir uma melhor eficiência no uso de energia e controle térmico, a fim de minimizar tais ganhos térmicos.

Por fim, vale ressaltar que os dados de temperatura operativa máxima anual, o percentual de horas de ocupação em uma faixa de temperatura operativa, a carga térmica total e desempenho termoenergético demonstraram superioridade na classificação quando comparados aos dados baseados na literatura. Logo, os resultados com propriedades térmicas baseadas na literatura alcançaram classificação no máximo "B", e os resultados com propriedades térmicas baseadas no ensaio térmico alcançaram classificação no máximo "A".

A análise dos dados também revela que, enquanto as previsões de desempenho nos modelos de literatura tendem a ser menos benéficas, os modelos do ensaio térmico revelam um desempenho mais consistente e, em alguns casos, melhor do que o esperado. Por exemplo, no caso da UH, houve um desempenho superior ao esperado com a obtenção da classificação "Superior/A" em vez de "Intermediário/B" ou "Mínimo/C" observados na etapa 1.

Dessa forma, foi possível confirmar a viabilidade do método de ensaio para análises térmicas desenvolvido, abrindo a possibilidade de dar continuidade a novas pesquisas utilizando a câmara térmica.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar o desempenho térmico e energético de sistemas construtivos, focando em soluções sustentáveis para a arquitetura e a construção civil, especialmente no uso de bioconcretos e no desempenho térmico das edificações. Para isso, foram realizadas simulações computacionais e experimentos práticos, buscando identificar alternativas que possam aumentar a eficiência energética e diminuir o impacto ambiental nas construções.

Através da revisão bibliográfica, foi possível aprofundar o entendimento sobre os principais fatores que influenciam o desempenho térmico das edificações e a importância da arquitetura e da construção civil na busca por sustentabilidade, particularmente diante das mudanças climáticas globais. A pesquisa destacou a relevância de materiais inovadores, como o bioconcreto, que surge como uma solução sustentável, tanto para enfrentar os desafios ambientais quanto para melhorar a eficiência energética nas construções.

A análise de estudos e casos apresentados por diversos autores evidenciou que a construção civil exerce significativo impacto no consumo de energia e na emissão de gases de efeito estufa, sobretudo em função do uso do cimento, além de estar associada à geração de elevado desperdício de recursos e intensos impactos ambientais. A utilização de resíduos da construção civil, como a serragem de madeira, se mostrou uma solução promissora, não só pelo reaproveitamento desses materiais, mas também pelas suas propriedades térmicas, que ajudam a melhorar o conforto interno e a reduzir a necessidade de climatização artificial.

A pesquisa também abordou diversas alternativas para minimizar os impactos ambientais das construções, como o bioconcreto, que incorpora resíduos de madeira. Isso não só ajuda a reduzir o volume de resíduos que iriam para aterros, como também melhora as propriedades térmicas do material, proporcionando edificações mais eficientes energeticamente. Além disso, o uso de materiais reciclados e a aplicação de conceitos como a economia circular têm sido explorados como maneiras de gerenciar melhor os resíduos na construção civil, diminuindo a extração de recursos naturais e a produção de novos materiais.

A partir da revisão, também se discutiu a importância de regulamentações como o INI-R, que buscam melhorar a eficiência energética das edificações. A integração de

sustentabilidade, inovação tecnológica e boas práticas construtivas pode transformar o mercado de construções, tornando-o mais eficiente em termos energéticos.

Os resultados da pesquisa indicaram que, apesar dos avanços com materiais como o bioconcreto, especialmente quando incorporados resíduos de madeira, a performance térmica das soluções testadas ainda enfrenta desafios importantes. A comparação entre os diferentes sistemas de vedação mostrou que o uso de materiais inovadores pode melhorar o conforto térmico e a eficiência energética das construções, mas um planejamento arquitetônico integrado, que leve em conta o clima local e as características dos materiais, é fundamental para alcançar altos padrões de desempenho térmico.

Os ensaios realizados com a câmara térmica permitiram verificar a transferência de calor nos dos painéis testados. A partir desses dados, foi possível calcular a condutividade térmica de cada parede e comparar com as simulações iniciais, cujos dados provinham da literatura. As simulações computacionais, alimentadas pelos dados experimentais, mostraram diferenças em relação aos valores de condutividade térmica da literatura, validando o uso da câmara térmica como uma ferramenta precisa e destacando o potencial do bioconcreto com serragem para reduzir a carga térmica das edificações.

As simulações realizadas com o programa EnergyPlus, juntamente com os ensaios laboratoriais, demonstraram a viabilidade do uso de materiais como o bioconcreto com resíduos de madeira em sistemas de vedação. No entanto, é essencial continuar os estudos para otimizar o desempenho térmico desses materiais em condições reais, além de garantir sua viabilidade estrutural e econômica em larga escala.

Por fim, a pesquisa reforça a urgência de adotar uma abordagem integrada e holística no planejamento arquitetônico e construtivo, considerando tanto os aspectos térmicos quanto a sustentabilidade. As soluções propostas têm o potencial de criar edificações mais eficientes, confortáveis e ambientalmente responsáveis, além de oferecer um ponto de partida para novas investigações e inovações no campo da construção sustentável. Isso não apenas contribui para o avanço do conhecimento técnico e científico na área, mas também sugere caminhos para integrar soluções sustentáveis no mercado da construção civil, visando um futuro mais eficiente e responsável.

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar o desempenho térmico e energético de sistemas construtivos, focando em soluções sustentáveis para a arquitetura e a construção civil, especialmente no uso de bioconcretos e no desempenho térmico das edificações. Para

isso, foram realizadas simulações computacionais e experimentos práticos, buscando identificar alternativas que possam aumentar a eficiência energética e diminuir o impacto ambiental nas construções.

5.1. Desafios do Estudo

Durante o desenvolvimento desta pesquisa, algumas limitações foram identificadas, o que impactou a profundidade e abrangência dos resultados. Dentre elas, destaca-se o tratamento da serragem, que apresentou desafios significativos devido às características do material. Por ser muito leve e possuir um grande volume, o tratamento em recipientes convencionais, como os utilizados no experimento, revelou-se limitado. Essa abordagem demandou um tempo considerável para manuseio e tratamento adequado, restringindo a eficiência do processo e, consequentemente, a capacidade de explorar outras variáveis e condições experimentais dentro do período disponível para a pesquisa.

Além disso, quanto aos dados de entrada usados nas simulações, foi necessário adotar uma simplificação, modelando os padrões de uso, ocupação e as configurações de ventilação natural com base no regulamento INI-R. No entanto, essa abordagem não refletiu exatamente o comportamento real dos usuários, o que pode comprometer a precisão das simulações. Além disso, a pesquisa não levou em conta parâmetros que poderiam influenciar o desempenho termo-energético, como a influência dos elementos de cobertura da edificação, o que limita a análise do comportamento térmico total das construções.

Embora as propostas de melhoria, como a utilização de painéis de bioconcreto com serragem de madeira, tenham demonstrado ganhos significativos no desempenho térmico, a pesquisa não considerou os custos associados à implementação dessas soluções. Questões como o alto custo de aquisição das fôrmas e a rigidez dos sistemas construtivos autoportantes não foram abordadas, mas podem impactar a adoção dessas tecnologias em larga escala.

Outro ponto importante que não foi suficientemente explorado foi a variabilidade das propriedades da serragem, o que pode dificultar a padronização do bioconcreto e, consequentemente, comprometer sua aplicação em larga escala.

Além disso, o uso de resíduos de madeira na produção de bioconcreto apresenta desafios devido à variabilidade das propriedades desses resíduos, o que pode afetar o desempenho

do material final. A falta de uma regulamentação específica para a aplicação de bioconcretos também constitui um obstáculo à viabilidade prática dessa solução.

Nos ensaios térmicos realizados na câmara térmica, não foi possível manter uma temperatura constante em todos os testes, o que evidenciou a necessidade de um sistema automatizado de controle de temperatura e resfriamento. Embora as perdas térmicas entre a câmara e o ambiente externo não tenham sido mensuradas, elas foram consideradas de baixo impacto para os resultados da pesquisa.

Essas limitações apontam para a necessidade de aprimoramento nas metodologias de ensaio, além da consideração de aspectos econômicos e regulatórios para tornar as tecnologias mais viáveis para adoção em larga escala no setor da construção civil.

5.2. Recomendações para trabalhos futuros

Em virtude da impossibilidade de abordar e analisar todos os parâmetros relacionados ao desempenho termo-energético das edificações, durante o desenvolvimento da dissertação foram identificadas algumas lacunas, que deram origem às seguintes recomendações:

- **Ampliação das Simulações Térmicas:** A pesquisa focou em avaliar um conjunto restrito de variáveis. Para futuras investigações, seria relevante ampliar essa análise para contemplar diferentes tipos de edificações e zonas bioclimáticas, como as áreas de clima quente e seco. Explorar como essas variações climáticas influenciam o desempenho térmico e energético das construções pode proporcionar uma visão mais abrangente.
- **Estudo sobre Materiais Alternativos:** O uso de resíduos de madeira se mostrou uma alternativa promissora, mas é fundamental investigar mais a fundo o impacto de outros tipos de resíduos orgânicos e como eles interagem com a matriz cimentícia. O desenvolvimento de bioconcretos multifuncionais, que combinem resíduos de madeira com outros materiais naturais ou nanotecnologias, como fibras e nanopartículas, poderia resultar em propriedades mecânicas e térmicas superiores. Essa abordagem poderia potencializar os benefícios dos bioconcretos, oferecendo soluções mais eficientes e sustentáveis para a construção civil.
- **Ensaio Adicionais para Confirmação dos Resultados:** A realização de ensaios adicionais em condições mais extremas de umidade e temperatura é essencial para fornecer dados importantes sobre a durabilidade dos bioconcretos, especialmente em

regiões com alta umidade. Além dos testes de condutividade térmica, é fundamental explorar também ensaios que avaliem a resistência ao fogo, garantindo que o bioconcreto seja viável e durável em diferentes tipos de construções. Esses testes adicionais ajudarão a validar a aplicação do material em uma variedade de condições ambientais e de uso.

- **Análise Econômica e de Viabilidade no Mercado:** Embora a pesquisa tenha evidenciado benefícios ambientais significativos, trabalhos futuros poderiam se beneficiar de uma análise mais detalhada de custo-benefício a longo prazo. Estudar a viabilidade econômica do bioconcreto em comparação com o concreto convencional é fundamental, levando em conta não apenas os custos de produção, mas também o impacto econômico de sua adoção em larga escala. Essa análise ajudará a compreender melhor as vantagens econômicas e a viabilidade do bioconcreto, facilitando sua integração no mercado da construção e promovendo uma transição mais eficiente para práticas mais sustentáveis.
- **Desenvolvimento de Diretrizes e Regulamentação:** A regulamentação da construção sustentável é uma área que demanda mais atenção. Futuros trabalhos podem incluir a proposta de novas normas técnicas e diretrizes de aplicação, que facilitem a integração dos bioconcretos com resíduos de madeira nas práticas normativas. Além disso, a criação de orientações específicas pode apoiar sua inclusão nos programas de certificação de construções sustentáveis, promovendo uma adoção mais ampla e padronizada dessas soluções inovadoras no setor da construção civil.
- **Investigação em Materiais de Revestimento:** Considerando o impacto positivo dos bioconcretos no isolamento térmico, uma linha de pesquisa importante seria explorar sua aplicação em revestimentos internos e externos de edificações. Para garantir que os bioconcretos possam ser uma alternativa viável em uma variedade maior de sistemas construtivos, como em residências multifamiliares, é fundamental realizar testes de durabilidade e resistência às intempéries. Esses ensaios ajudarão a confirmar a capacidade do material de suportar as condições ambientais adversas ao longo do tempo, ampliando suas possibilidades de uso em diferentes contextos da construção civil.
- **Desenvolvimento de misturas com a porção mais fina da serragem (pó):** A pesquisa se concentrou no desenvolvimento de misturas com a porção mais grossa da serragem (lasca). No entanto, a utilização do pó de serragem, em vez das lascas de madeira, pode ter várias implicações nas propriedades do bioconcreto. O pó de

serragem, por ser mais fino e ter uma maior área de superfície exposta, pode melhorar a adesão entre o aglomerante (cimento) e o resíduo de madeira, promovendo uma coesão interna mais eficiente. Essa maior área de contato também pode potencialmente melhorar as propriedades térmicas do bioconcreto, proporcionando um isolamento superior devido à sua menor densidade. Porém, essa estrutura mais fina pode reduzir a resistência mecânica do material, já que o pó de serragem tende a funcionar como um preenchimento. Esse impacto pode ser analisado por meio de ensaios de resistência à compressão, flexão e absorção de água, ajudando a entender como a substituição das lascas afeta a durabilidade e a impermeabilidade do bioconcreto.

Além disso, o uso de pó de serragem pode facilitar a incorporação do resíduo ao concreto, oferecendo uma solução mais eficiente do ponto de vista do processamento, visto que o pó é um subproduto amplamente disponível em serrarias. Isso pode resultar em uma redução nos custos de produção e proporcionar uma alternativa mais sustentável e econômica para a indústria da construção.

- **Desenvolvimento de tijolos em bioconcreto prensados:** Uma das perspectivas promissoras para futuras pesquisas no campo da construção sustentável é o desenvolvimento de tijolos a base de bioconcreto de madeira prensados. Este processo poderia representar uma alternativa inovadora aos materiais convencionais, aproveitando resíduos de madeira, como serragem ou lascas, para criar tijolos com alto desempenho térmico e baixo impacto ambiental. A prensagem, que envolve a compactação da mistura de bioconcreto sob alta pressão, pode resultar em uma aglutinação mais eficiente entre os materiais, melhorando a coesão interna e, consequentemente, as propriedades mecânicas do tijolo, como resistência à compressão e flexão. Além disso, a prensagem permite um controle mais preciso sobre a densidade do material, o que pode otimizar suas características de isolamento térmico, tornando o tijolo mais leve e eficaz no controle da temperatura interna das edificações. Essa abordagem abre um vasto campo de estudo, especialmente no que diz respeito à análise das variáveis envolvidas no processo de prensagem, como a quantidade e o tipo de resíduo de madeira, e como essas variáveis afetam as propriedades do bioconcreto. Pesquisas futuras poderiam investigar como diferentes formas de prensagem e diferentes frações de resíduos influenciam a resistência mecânica, a durabilidade e as propriedades térmicas do bioconcreto. Além disso, seria importante explorar a viabilidade econômica e a sustentabilidade do processo em

grande escala, considerando o impacto ambiental e os custos de produção. Esse tipo de inovação poderia abrir caminho para a adoção de soluções mais eficientes e sustentáveis na construção civil, além de fornecer uma nova aplicação para resíduos de madeira, promovendo um ciclo de reaproveitamento mais eficiente e econômico.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11768:2019. **Aditivos Químicos**. Rio de Janeiro, 2019

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16917:2021. **Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2021

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16916:2021. **Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 17054:2022. **Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2022.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9778:2005. **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6136:2016. **Blocos vazados de concreto simples para alvenaria — Requisitos**. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16605:2017. **Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2020.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16889:2020. **Concreto - Determinação do índice de consistência pelo espalhamento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 2020.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5739:2018. **Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15220:2022. **Desempenho térmico de edificações - Parte 1: Definições, símbolos e unidades**. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15220-2:2022. **Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações**. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15220-3:2024. **Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático por desempenho.** Rio de Janeiro, 2024.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7215:2019. **Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2019.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15575:2021. **Edificações habitacionais - Desempenho.** Rio de Janeiro, 2013.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR16055:2022. **Parede de concreto moldada no local para a construção de edificações - Requisitos e procedimentos.** Rio de Janeiro, 2022.

Aguiar, A. (2020). **Estabilidade térmica e reação ao fogo do bio-concreto de madeira.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

Almeida, T. **A influência dos materiais de sistemas de vedações verticais no desempenho termo-energético de edificações: habitações de interesse social no Rio de Janeiro.** Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, PROARQ. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

Andreola, V. **Caracterização física, mecânica e ambiental de bio-concretos de bambu.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

Augusto, C.; Bragança, L.; Almeida, M. **Materiais de isolamento térmico de edifícios: para além da energia operacional,** 2018. Encontro Latino-Americano e Europeu sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, 561–570.

Bao, Z.; Lee, W. M. W; Lu, W. **Implementing on-site construction waste recycling in Hong Kong: Barriers and facilitators.** Science of the Total Environment, 2020, 747: 141091.

Baptista, M. **Contributos para a implementação da avaliação de sustentabilidade ambiental de edifícios.** Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente). Escola Superior de Tecnologia e Gestão. Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, 2022.

Barbosa, T.; Sant’Anna, B.; Gustavo, L.; Cruz, G.; Paulo, P.; Gabi, M.; De Paula, T.; Luz, S. M.; Sabino, J.; Silveira, E. **Waste-to-Energy in the Civil-Construction Sector toward the Valuation of Wood Construction Residues: Integration of Torrefaction Process.** Fuel 2024, 371, 132029.

Berleza, A. **Sustentabilidade e inovação em materiais e sistemas construtivos para o projeto de edificações.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura). Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, PROARQ. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

Brasil. **Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO).** Portaria nº309 - Instruções Normativas e Requisitos de Avaliação da Conformidade para a Eficiência Energética das Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas e Residenciais. 2022.

Brasil. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). **Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais.** Brasília, 2012.

Brasil. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). **Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas.** Brasília, 2010.

Brasil. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais – INI-R.** Brasília, 2022.

Breeam. **What is Breeam?** Disponível em: <<https://www.breeam.com>>. Acesso em: Outubro 2023.

Calvani, C. **Aproveitamento do pó de serra no concreto: avaliação das propriedades físicas e mecânicas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, 2018.

Chen Y-C. **Effects of urbanization on municipal solid waste composition.** Waste Manage, 2018;79:828–36.

Correa, S. Mudanças climáticas: impacto, mitigação e adaptação. Porto Alegre: IGeo/UFRGS, 2024. ISBN 978-65-009-1822-9.

Da Gloria, M., 2015. **Desenvolvimento e caracterização de painéis sanduíches de concreto com núcleo leve e faces em laminados reforçados com fibras longas de sisal.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

Da Gloria, M., 2020. **Comportamento experimental e numérico de bioconcretos de madeira e painéis sanduíches com faces em laminados reforçados com fibras longas de sisal.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

Ellen MacArthur Foundation. 2013. **Towards the circular economy.** Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an>. Acesso em: julho 2023.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Balanço Energético Nacional 2022: Ano base 2021.** Rio de Janeiro: EPE 2022a. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao675/topico-638/BEN2022.pdf>>. Acesso em março 2023. EPE (Empresa de Pesquisa Energética).

EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2022: Ano base 2021.** Rio de Janeiro: EPE 2022b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-631/BEN_S%C3%ADntese_2022_PT.pdf>. Acesso em março 2023.

Fernandes, P. **A história da madeira como material na arquitetura.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura). Faculdade de Arquitetura e Artes da Universidade Lusíada de Lisboa, 2020.

Freestone, I. **The Recycling and Reuse of Roman Glass: Analytical Approaches.** Journal of glass studies. 57. 29-40, 2015.

Frota, A., Schiffer, S. **Manual de conforto térmico.** São Paulo: Studio Nobel. Acesso em: 05 de abril 2007.

Fan, L.; Ellison, B.; Wilson, L. **What food waste solutions do people support?** Journal of Cleaner Production, v. 330, p. 129907, 2022.

F. Hasan, P.t.G.r. Horv'ath, T. Alpar, ' Nanotechnology for waste wood recycling, in: Nanotechnology in Paper and Wood Engineering, Woodhead Publishing, Duxford, United Kingdom, 2022, pp. 61–80.

- Fuwape, J.; Oyagade, A. (1993) **Bending strength and dimensional stability of tropical wood cement particleboard**. *Bioresource Technol* 44:77–79
- Garcez, M.; Machado, A; Garcez, E.; Gatto, D., 2018. **Tijolos leves para alvenaria produzidos a partir de resíduos da indústria madeireira**. *Engenharia Sanitaria E Ambiental*, 23(3), 607–614. 2018.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N., Hultink, E, 2017. The circular economy – a new sustainability paradigm? *J. Clean. Prod.* 143, 757–768.
- Guimarães, J. *et al.* **Biological concrete, a viable alternative in modern civil construction: Review**. *International Journal of Scientific Management and Tourism*, v. 10, n. 6, p. 01-37, 2024.
- Guo, H.; Peihan, L.; Qiuyi, L.; Guoying, F.; Qichang, Y; Gongbing, S; Shuo, Z; Shidong, W; Liang, G. (2022). **Properties of Light Cementitious Composite Materials with Waste Wood Chips**.
- Islam, R.; Nazifa, T.; Yuniarto, A.; Uddin, S.; Salmiati, S.; Shahid, S. **An empirical study of construction and demolition waste generation and implication of recycling**. *Waste Manag.* 2019, 95, 10–21.
- INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial). **Programa Brasileiro de Etiquetagem**. Disponível em: <<http://www2.inmetro.gov.br/pbe/>>. Acesso em março 2023.
- Iwakiri, S.; Prata, J. **Utilização da madeira de Eucalyptus grandis e Eucalyptus dunnii na produção de painéis cimento-madeira**. *Cerne, Lavras*, v.14, n.1, p.68-74, 2008.
- Kabirifar, K., Mojtahedi, M., Wang, C., Tam, Y., 2020. **Construction and demolition waste management contributing factors coupled with reduce, reuse, and recycle strategies for effective waste management: a review**. *J. Clean. Prod.* 263, 121265.
- Kibert, C. **Edificações sustentáveis: projeto, construção e operação**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2020.
- Koivukangas, S. **Eficiência energética sob perspectivas técnicas nos usos finais aplicada ao caso de uma escola**. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

Lamberts, R.; Dutra, L.; Pereira, F. **Eficiência energética na arquitetura**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Eletrobrás/PROCEL, 2014.

Latorraca, J. **Eucalyptus spp. na produção de painéis de cimento-madeira**. 2000. 191f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2000.

Le, D. *et al.* **Circular bio-based building materials: A literature review of case studies and sustainability assessment methods**. Building and Environment, v. 244, p. 1-12, 2023.

Li, C.; Zhao, Y.; Xiao, B.; Yu, B.; Tam, V.; Chen, Z.; Ya, Y. **Research trend of the application of information technologies in construction and demolition waste management**. J. Clean. Prod. 2020, 263, 121458.

Lizárraga, M.; Liliana, L.; Luis, V. (2022). **Municipal Solid Waste as a Substitute for Virgin Materials in the Construction Industry: A Review**. Sustainability. 14. 16343. 10.3390/su142416343.

Martinho, P., **Análise do comportamento de argamassas com a incorporação de “pellets” de madeira**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2017.

Moreira, A. **Influência da aplicação do resíduo de madeira na composição de blocos de concreto para alvenaria de vedação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Pará, 2008.

Naik, T. *et al.* **Use of post-consumer waste plastics in cement-based composites**. Cement and Concrete Research, v. 26, n. 10, p. 1489-1492, 1996.

Nunes, K.; Mahler, C. (2019). **A disposição ilegal de resíduos da construção civil e seu impacto na resiliência da cidade do rio de janeiro**. 1º Seminário RRD RIO.

NPPG, TI; B. Oliveira, S.; Alves, L. **Novas tecnologias em gestão da sustentabilidade nas obras civis**. Boletim do Gerenciamento, [S.l.], v. 37, n. 37, ago. 2023. ISSN 2595-6531.

Pacheco, M. Ventilação natural e estratégias bioclimáticas em edificações: análise de desempenho térmico e energético. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

Pacheco-Torgal, F. *et al.* **Eco-efficient construction and building materials**. Springer, 2013.

Paiva Filho, J. *et al.* **Diagnóstico do uso da madeira como material de construção no município de Mossoró-RN/Brasil**. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 23, n. 3, 2018.

Peres, A. **Cidades eficientes, cidades confortáveis: um método multidisciplinar de otimização de sistemas fotovoltaicos integrados a edificações**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura). Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, PROARQ. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

Pimentel, L. **Telhas Onduladas à Base de Cimento Portland e Resíduos de *Pinus caribaea***. 67 f. São Paulo, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Escola de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2000.

PROCELINFO. **O Programa**. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?TeamID={921E566A-536B-4582-AEAF-7D6CD1DF1AFD}>>. Acesso em: Março 2023. PROJETEEE (Projetando Edificações Energeticamente Eficientes).

Ramos, R.; Longue J.; Dalton, F.; Medeiros, N. (2024). **Influência da densidade básica e da composição química da madeira para a indústria de polpa celulósica: um estudo de caso**. *Ciência Florestal*. 34. e85566.

Righetti, G.; Zilio, C.; Guarda, D.; Feo, D.; Auerbach, M.; Butters, M.; Mancin, S. **Experimental analysis of a commercial size bio-based latent thermal energy storage for air conditioning**. *Journal of Energy Storage*, v. 72, p. 108477, 2023.

Santos, M.; Aguilar, M. **Painéis de madeira como vedação vertical em construções**. *Cadernos de Arquitetura e Urbanismo*, v. 14, n. 15, p. 242–263, 2007.

Santos, F.; Almeida, M. **O impacto do Selo Casa Azul na Habitação de Interesse Social no Brasil**. *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais*, v. 20, n. 3, p. 66-85, 2018.

Saramago, R. **Arquitetura sustentável? Quando o discurso não mais sustenta um futuro para a prática arquitetônica**. Tese (Mestrado em Arquitetura), Instituto de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

Shigue, E. **Difusão da Construção em Madeira no Brasil: Agentes, Ações e Produtos**. Dissertação (Mestrado em Ciências). Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2018.

Siddique, R. *et al.* **Use of waste materials in concrete: A review**. Resources, Conservation and Recycling, v. 28, n. 10, p 1835-1852, 2008.

Silva, A. *et al.* **Análise das características físicas e propriedades mecânicas de argamassa com inserção de resíduos de madeira**. Revista Materia, v. 26, n. 1, p. 01-11, 2021.

Silva, J.; Reyes, J. **Manual EnergyPlus**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, 2023. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/21590>. Acesso em: Março 2025.

Shooshtarian, S.; Maqsood, T.; Caldera, S.; Ryley, T. (2022). **Transformation towards a circular economy in the Australian construction and demolition waste management system**. Sustainable Production and Consumption, 30, 89–106.

Sorgato, M. Desempenho Térmico de Edificações Residenciais Unifamiliares Ventiladas Naturalmente. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

Swami, M.; Chandra, S. **Correlation for pressure distribution on buildings and calculation of natural-Ventilation airflow**. ASHRAE Transactions. 1988.

Tosta, E.; Noleto, R.. **O papel do espaço público na construção da cidade compacta sustentável: as estratégias de projeto e os benefícios resultantes para uma sociedade urbana**. Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades, [S. l.], v. 5, n. 32, 2017.

Vasconcelos, L.; Sousa, J. **A implementação do AQUA-HQE na construção civil brasileira**. Revista de Sustentabilidade, v. 11, n. 1, p. 44-59, 2019.

UN Environment Programme. **Population Division of the Department of Economic and Social Affairs**. 2024a. Revision of World Urbanization Prospects. Disponível em: <https://population.un.org/wpp/graphs?loc=900&type=Demographic%20Profiles&category=Line%20Charts>. Acesso em: Agosto 2024

UN Environment Programme. **Global Waste Management Outlook 2024: Beyond an age of waste – Turning rubbish into a resource**. Nairobi: UNEP, 2024. Disponível em:

<https://www.unep.org/resources/global-waste-management-outlook-2024>. Acesso em: Agosto 2024.

USGBC. LEED rating systems. U.S. Green Building Council. Disponível em: <https://www.usgbc.org/leed>. Acesso em: Outubro 2023.

Viezzler M. **Utilização de resíduo madeireiro amazônico na produção de blocos de vedação para construção civil**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade do Vale do Taquari, 2022.

Zhang, Z.; Chen, J.; Zhang, Y.; Liu, L.; Chen, M.; Yang, A; Osman, M; Farghali, E.; Liu, D. Hassan. **Municipal solid waste management challenges in developing regions: A comprehensive review and future perspectives for Asia and Africa**, Sci.Total Environ (2024).

World Green Building Council. **Bringing embodied carbon upfront**. 2019. Disponível em: <https://www.worldgbc.org>. Acesso em: Outubro 2023.